

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikka

Elektroniikkasuunnittelu

2016

Joona Arponen

DLT-PROTOKOLLA JA SEN KÄYTETTÄVYYDEN ARVIOINTI VALAISINJÄRJESTELMÄSSÄ



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Joona Arponen

DLT-PROTOKOLLA JA SEN KÄYTETTÄVYYDEN ARVIOINTI VALAISINJÄRJESTELMÄSSÄ

Tässä työssä tutkittiin LED-valaisinta kokonaisuutena uutta Digital Load-Side Transmission –standardia painottaen. DLT on digitaalinen valaisinohjausprotokolla ja sen soveltuvuutta tutkittiin LED-valaisinten himmennuksen säädössä. Työssä tutustuttiin DLT:tä tukevaan iW6401-ohjainpiiriin ja verrattiin ohjainpiirin kehitysalustaa toisen valmistajan kehittämään DLT-valaisimeen. Tarkoituksena oli selvittää käyttökelpoisuus standardille ja tarjota tutkimuspohja mahdollisille valaisinsovelluksille. LED-valaisinten yleistyminen on vaatinut valaisinvalmistajia kehittämään toimivia himmennysratkaisuja, joista yksi on DLT.

DLT-standardin ja iW6401-ohjainpiiriin ajankohtaisuus ja yleinen halu ottaa teknologia käyttöön valaisinteollisuudessa ovat syynä työn toteuttamiseen. Tavoitteena oli tutustua DLT-protokollaan ja varmistaa sen toimivuus. Lisäksi verrattiin iW6401-kehitysalustan piiriratkaisua kilpailijan DLT:tä tukevaan ratkaisuun. Tämä tehtiin, jotta voitaisiin arvioida piiriä tuotekehityksen kannalta.

LED-ohjainten ominaisuudet mitattiin ja himmennuksen toimivuutta tutkittiin. LED-valaisinten laatuvaatimuksia erityisesti standardien osalta tutkittiin ja hyödynnettiin LED-ohjainpiirejä mitattaessa. iW6401-piiriin hyödyntämistä DLT:tä tukevissa LED-valaisinsovelluksissa pohdittiin. Protokolla ja sovellukset todettiin toimiviksi ja standardivaatimusten mukaisiksi. Valmiin ohjauspiiriin käyttö osoittautui helpoksi ratkaisuksi valaisinsovelluksen toteuttamiseen, mutta myös yksinkertaisempi ratkaisu esitettiin vartenotettavaksi vaihtoehdoksi.

ASIASANAT:

DLT, LEDOTRON, IEC-standardit, LED, teholähteet, himmennys, valaisinohjaus-protokolla.

Joona Arponen

DLT-PROTOCOL AND EVALUATION OF ITS APPLICATIONS FOR LIGHTING-SYSTEM

This thesis studied a new digital dimming -protocol for LED-lighting called Digital Load-Side Transmission and its appliance for controlling interior lighting. The growth of LED-products in lighting market has forced the major companies in the lighting industry to develop working functional dimming-applications of which one is DLT. The theme of this thesis was chosen since the need for more publications of the DLT-protocol and its applications and the topicality of the new protocol.

A novel DLT-supporting LED-driver -IC iW6401 was examined and tested using iW6401 based DLT-developer -board and were compared to competitor's market-available DLT-supported LED-light -product. The purpose for this evaluation was to determine whether this standard is usable and benefit from the research by using DLT-applications in future products.

The characteristics of these products were measured and the performance of the dimming was examined. The quality requirements and standards were examined and some were evaluated. Some of those characteristics were flicker-effect in dimming, conducted electromagnetic behavior especially on the lower dimming adjustments. The potential of using iW6401 was then evaluated and some alternatives were also considered. The protocol and the products were success and iW6401 was considered a good platform for DLT-supported product although alternative solution was also suggested to be considered.

KEYWORDS:

DLT, LEDOTRON, IEC-standards, LED, LED-driver, dimming, lighting control protocol.

SISÄLTÖ

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	VII
1 JOHDANTO	1
2 LED-VALAISTUS	2
2.1 LED-puolijohteen toiminta	2
2.2 LEDin säteilyn värilämpötila	5
2.3 Välinkyntä	6
2.4 LED-valaisimen rakenne	8
2.5 LED-ohjain -topologiat	9
2.5.1 Buck- ja boost- tyyppiset hakkurilähteet	10
2.5.2 Flyback-tyyppinen hakkuriteholähde	11
2.6 Valaisimen standardit ja vaatimukset	12
2.6.1 LED-valaisimista ja lisälaitteista aiheutuvat johtuvat häiriöt ja rajat	13
3 VALAISIMEN HIMMENNYS- JA OHJAUSPROTOKOLLAT	16
3.1 DLT-protokollan esittely	17
3.2 Manchester-koodaus	21
3.3 Viestirunko	21
5 LED-OHJAINPIIRI IW6401	25
5.1 Ominaisuudet	25
6 MITTAUKSET	28
6.1 Mittalaitteet	29
6.2 Valaisinten tehon ja virran käyttäytyminen himmennyksessä	30
6.3 Valaisimen lisälaitteen virran kulutus	31
6.4 DLT-viesti mittauksissa	32
6.5 Johtuvat häiriöt mittauksissa	33
6.6 Virtalähteen toiminta himmennyksessä	37
6.7 Välinkyntä	38
7 SOVELLUKSET JA POHDINTA	40

7.1 Päätelmät	41
---------------	----

8 YHTEENVETO	44
---------------------	-----------

LÄHDELUETTELO	45
----------------------	-----------

LIITTEET

Liite 1. Mittauskuvat

KUVAT

Kuva 2.1 Creen XP-G LED-komponentin virta-jänniteyhtälön kuvaaja (25 C). [9]	4
Kuva 2.2 Elektronin siirtyminen liitoksen läpi ja fotonin syntyminen.	5
Kuva 2.3 Cree XP-G LEDin suhteellisen säteilyteho suhteessa aallonpituuteen. [9]	6
Kuva 2.4 Valaisimen välkyntää havainnollistava kuvaaja. [13]	7
Kuva 2.5 LED-valaisimen yleinen moduulirakenne.	8
Kuva 2.6 Esimerkkikuva LED-ohjaimen rakenteesta.	9
Kuva 2.7 Esimerkki jännitettä laskevan hakkuriteholähdetopologian piirikaaviosta.	10
Kuva 2.8 Esimerkki jännitettä nostavan hakkuriteholähdetopologian piirikaaviosta.	11
Kuva 2.9 Esimerkki galvaanisesti erotetun flyback-hakkuriteholähteen piirikaaviosta.	11
Kuva 2.10 IEC EN55015:2006 asettamat rajat johtuville vuodoille. [19]	13
Kuva 2.11 Harmonisten virtojen maksimikuvaaja ajan suhteen. [4]	14
Kuva 3.1 Himmennys-topologiat: Himmennyksen toimivuus ja asennettavuus. [21]	17
Kuva 3.2 Ohjainyksikkö ja valaisinyksikkö DLT-protokollassa. [3]	18
Kuva 3.3 DLT:n aaltomuoto. [3]	19
Kuva 3.4 Ohjausyksikön DLT-signaalin aaltomuoto verkkojännitteessä. [23]	20
Kuva 3.5 Manchester-koodauksen kuvaaja. [26]	21
Kuva 3.6 Esimerkki DLT-viestisignaalista. [23]	23
Kuva 5.1 iW6401-piirin lohkokaavio. [26]	26
Kuva 5.2 iW6401 kehitysalustan piirikaavio. [27]	27
Kuva 6.1 Testausalusta referenssi-LED-ohjainpiirille ja iWatt-kehitysalustalle.	28
Kuva 6.2 Testattujen valaisinten virran ja tehon kuvaajat himmennuksen suhteen.	30
Kuva 6.3 Himentimen ja LED-valaisimen kokonaisvirtamittaus.	31
Kuva 6.4 Mitattu käyttöjännitteen kuvaaja DLT-ohjaimen jälkeen ja tarkennettu kuvaaja ohjainyksikön käyttöjännitteen leikkauksesta.	32
Kuva 6.5 DLT-viesti tarkennettuna ensimmäisestä jakson puolikkaasta tarkennettuna.	33
Kuva 6.6 Referenssivalaisimen johtuvat häiriöt verkkoon minimihimmennystasolla.	34
Kuva 6.7 Referenssivalaisimen johtuvat häiriöt verkkoon maksimihimmennystasolla.	35
Kuva 6.8 iWatt-kehitysalustan johtuvat häiriöt verkkoon minimihimmennystasolla.	35
Kuva 6.9 iWatt-kehitysalustan johtuvat häiriöt verkkoon maksimihimmennystasolla.	36
Kuva 6.10 Vertailtava toisen valmistajan LED-ohjainpiiri.	37
Kuva 6.11 iWatt-kehitysalusta: LED-ohjainpiiri ja iW6401.	37
Kuva 7.1 iW6401-piirin datalehtisen esimerkkipiirikytkentä Bluetooth-moduulilla. [26]	40
Kuva 7.2 DLT-viestin suodatus verkkojännitteestä. [23]	41

TAULUKOT

Taulukko 1. Rajat harmonisille virroille (EN 61000-3-2)	15
Taulukko 2. DLT-viestin osiot ja sisältö.	22
Taulukko 3. DLT-tilat, tyypit ja niiden soveltuvuus.	23

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

ϕ_v	Valovirta, lm
f	Taajuus
h	Plankin vakio ($6,626075540 \cdot 10^{-34}$ Js)
k	Boltzmannin vakio ($1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$)
q	Elektronin alkeisvaraus ($1,602 \cdot 10^{-19}$ As)
E_f	Fotonin energia
I	Virta
I_S	Diodin kyllästysvirta
$I_{p(abs)}$	Harmonisen virtakuvaajan ylempi absoluuttinen raja-arvo
I_{p+}	Harmonisen virtakuvaajan ylempi raja-arvo
I_{p-}	Harmonisen virtakuvaajan alempi raja-arvo
$P_{CD, max}$	Ohjauslaitteen maksimiteho
R_b	DLT-viestin bittien siirtonopeus
T_b	DLT-viestin bittien siirtoaika
U	Jännite
U_T	Terminen jännite
$W_{CD, max}$	Ohjauslaitteen maksimienergia
AC	Vaihtovirta
DALI	Valaisinohjausprotokolla (engl. Digital Addressable Lighting Interface)
DC	Tasavirta
DLT	Digital Load-Side Transmission -protokolla (IEC 62756-1)
DMX	Esitysvalaisimen ohjausprotokolla (engl. Digital MultipleX)
EMI	Sähkömagneettinen häiriö/interferenssi

EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus
HC	Korkea virta (engl. High current)
KNX	Kodin automaation ohjausjärjestelmä
LC	Matala virta (engl. Low current)
LDO	Alhainen jännitehäviö tulon ja lähdön välillä (engl. Low drop-out regulator)
LED	Hohtodiodi
LEDIM	AC-jännitteen nousevan reunan leikkaukseen perustuva himmennys (engl. Leading edge dimming)
MOSFET	Metallioksidi-puolijohdetransistori
OTP	Kertaohjelmoitava muisti (engl. One Time Programmable memory)
PF	Tehokerroin
PLC	Datasähkö (engl. Power line communication)
PWM	Pulssinleveysmodulaatio
SoT	Viestipaketin alku (engl. Start of Telegram)
TEDIM	AC-jännitteen laskevan reunan leikkaukseen perustuva himmennys (engl. Trailing edge dimming)
Triac	Puolijohdekomponentti, jossa on kaksi vastakkaisesti suuntiin rinnan kytkettyä tyristoria, joiden hilat on kytketty yhteen
UPB	Tiedonsiirtoprotokolla datasähkölle (engl. Universal powerline bus)

1 JOHDANTO

LED-teknologian käytön yleistyessä valaistusteknologian alalla, on globaalisti käytettävien laitteiden vaatimuksia ja yhteensopivuuksia pyritty lisäämään hallinnollisten organisaatioiden toimesta. EU:n sisämarkkinoita on pyritty harmonisoimaan uusilla direktiiveillä ja kansainväliset standardoimisjärjestöt, kuten IEC, ovat luomassa raameja LED-valaisimille ja oheislaitteille tuotteiden laadun ja turvallisuuden takaamiseksi. Perinteiset hehku- ja loisteputkilamput korvaavan LED-valaisimen toiminnallisuus ei pääosin muutu edeltäjiinsä verrattuna. Etäohjaus katkaisimien osalta ei aiheuta yhteensopivuusongelmia LED-virtalähteiden kanssa, mutta esimerkiksi himmennys on jo vaikeampaa toteuttaa LED-valaisimille. [1, 2]

Valaisinohjaukseen tarkoitettu DLT-protokolla, johon tässä opinnäytetyössä keskitytään, esiteltiin Insta Electron julkaisemassa Bernd Siebelin artikkelissa [3], jossa käytiin läpi protokollan perusteet. DLT-protokollaa on tutkinut lyhyesti Janne Vilppo [2] opinnäytetyössään, jossa esiteltiin laajalti eri valaisinohjausjärjestelmiä ja niiden soveltuvuutta sisätilan valaisuun. Vaatimuksia himmennuksen lisälaitteille on asettanut erityisesti IEC, jonka standardit esitellään SFS:n LED-teknologiaa käsittelevissä standardijulkaisuissa [4, 5].

Tässä opinnäytetyössä käsitellään LED-valaisimen kokonaisuutta DLT-protokollaa (Digital Load-Side Transmission) painottaen. DLT on LED-lampuille kehitetty digitaalinen ohjausprotokolla, jossa ohjauskomennon databitit on moduloitu verkkojännitteeseen yksinkertaistamaan DLT-laitteiden asennettavuutta kiinteistöihin. Aluksi työssä käydään läpi LED-teoriaa, LEDin toimintaa ja fysikaalisia lainalaisuuksia. Seuraavaksi esitellään yleisesti LED-valaisimen rakennetta ja kokonaisuutta, jonka jälkeen käsitellään yleisimmät LED-ohjain -topologiat ja niiden toimintaperiaatteet. Kun valaisimen rakenne ja osat on esitelty, siirrytään standardeihin ja niiden määrittelemiin vaatimuksiin. Standardeissa painotetaan erityisesti työn kannalta tärkeää DLT-protokollaa.

Teoriaosuuden jälkeen esitellään iW6401-piiri, jonka toimintaa ja soveltuvuutta arvioidaan mittaamalla sen pohjalta kehitettyä LED-ohjainpiiriä ja vertaamalla sen ominaisuuksia vastaavaan toisen valmistajan sovellukseen. Lopuksi arvioidaan iW6401-piirin toiminnallisuutta ja sen toteutusvaihtoehtoja DLT-valaisinsovellukseen ja esitetään vaihtoehtoinen ratkaisu toteutettavaksi ilman iW6401-piiriä.

2 LED-VALAISTUS

LED on saanut valaisinkäytössä energiatehokkuuden ja pitkän käyttöiän takia merkittävän markkinaosuuden. Vuonna 2009 Euroopan ekologista suunnittelua koskevan direktiivin 2009/125/EY seurauksena hehkulamput kiellettiin asteittain Euroopan alueella, mikä myös vauhditti LED-tuotteiden markkinoita [22]. LED-valaisinten osuus kaikista valaisin-tuotteista on arvioitu vuonna 2012 tehdyssä McKinsley & Co:n selvityksessä [10] olevan vuonna 2016 mennessä 45 % ja kasvavan vuoteen 2020 mennessä 69 %:iin.

Yksittäisen LED-komponentin tai ”chipin” teoriakatsauksen jälkeen tässä opinnäytetyössä tarkastellaan LED-moduulia. IEC-standardi 62031:2008 määrittelevät LED-moduulin ”valonlähteen sisältävänä yksikkönä, joka voi sisältää yhden tai useamman LEDin, muita komponentteja kuten optisia, mekaanisia, sähkö- ja elektronisia komponentteja pois lukien ohjauslaitteen.” [11] Toisin sanottuna LED-moduuli on valonlähde ilman virtalähdettä. Myös Zhaga-standardi antaa saman määrittelyn LED-moduulille. [12]

LED-tekniikan yleistyessä ja sen korvautessa hehku- ja loisteputkilamput LED-valaisinten sovelluskohteet ovat laajentuneet, LEDien valontuottokyky on parantunut ja valaisinten hyötysuhde on parantunut entisestään. Tähän on vaikuttanut LED-puolijohdemateriaalien ja tekniikan kehittyminen. Valaistukseen sopiva valkoinen valo on saavutettu LEDin puolijohdemateriaaliin vaikuttamalla. [7]

Teholähdetopologioita muuttamalla ja parantamalla esimerkiksi ulostulojännitteen korjauksella on saatu toteutettua hyvä hyötysuhde, jolla varmistetaan pieni tehonkulutus. Valaisimen käyttöikä on huomattavasti pidempi kuin vanhemmilla valaisintyypeillä ja ikää rajoittava tekijä onkin LED-valaistuksessa virtalähteen komponenttien kesto, eikä itse valonlähde. [18]

2.1 LED-puolijohteen toiminta

Light emitting diode (LED) on puolijohdekomponentti, jonka puolijohtava materiaali säteilee valoa kun puolijohteen läpi kulkee virtaa tai sähkökenttä. Epäorgaanisen materiaalin kyky säteillä huomattiin jo 1900-luvun alussa. Valoemission tutkiminen jatkui ja ensimmäinen valkoista valoa säteilevä LED esiteltiin vuonna 1995. [7]

LEDin käyttäytymistä puolijohteena virtapiirissä voidaan kuvata puolijohdediodin virtajänniteyhtälöllä:

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

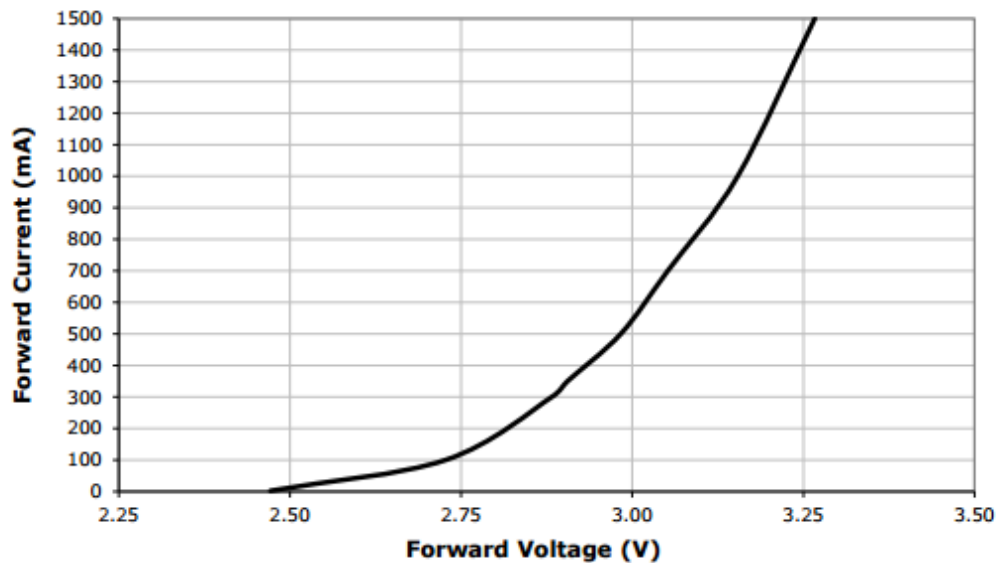
Tässä kaavassa I on tasavirta kytkennän läpi, I_s on saturaatiovirta, U on tasajännite piirissä, n on emissiokerroin (ideality factor) ja U_T on terminen jännite. Terminen jännite kuvaa lämmön aiheuttamaa kerrointa yhtälössä. Se voidaan laskea kaavalla [8]:

$$U_T = \frac{kT}{q} \quad (2)$$

Tässä kaavassa T on lämpötila kelvineinä, k on Boltzmannin vakio ($1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$) ja q on elektronin alkeisvaraus ($1,602 \times 10^{-19} \text{ As}$).

LED eroaa muista diodeista siinä, että se säteilee valoa ja sen kynnysjännite on korkeammalla kuin perinteisillä diodeilla. Tavallisen diodin kynnysjännite on tavanomaisesti 0,7 V:n luokkaa, kun taas LEDillä se on tyypillisesti 1,8–2,2 V. Valkoista valoa säteilevillä LEDeillä kynnysjännite on yleisimmin 3,5–4,2 V:n alueella. Tosin nykyään kynnysjännite voi olla alempana. LED käyttäytyy kuten perinteinen diodi, joten sen vakaaseen toimimiseen tarvitaan jonkinlainen virranohjaus. [8]

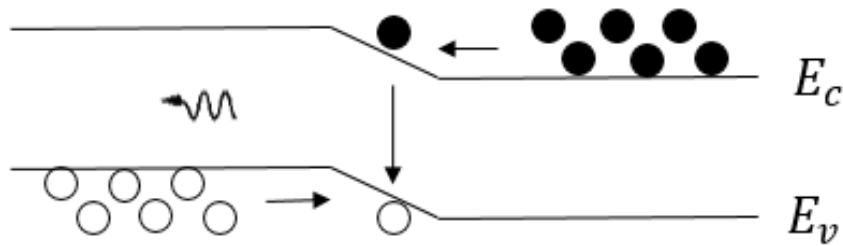
Kuvassa 2.1 on esimerkki Creen Xlamp XP-G LED-komponentin virtajänniteyhtälön kuvaajasta. Kuvaajan arvot ovat 25 °C:n lämpötilassa saatuja arvoja. XP-G on tarkoitettu valaisinkäyttöön ja on yksittäiseksi LED-komponentiksi tehokas. Se kestää 1500 mA:n virtaa. Kuvassa on esitetty siis LED-komponentin läpi menevä virta (mA) jännitteen (V) suhteen.



Kuva 2.1 Cree XP-G LED-komponentin virta-jänniteyhtälön kuvaaja (25 C). [9]

I-V-kuvaajassa näkyy Cree XP-G LED-komponentin kynnysjännitteen kasvu virran suhteen. Komponentin käyttövirran ollessa 350 mA tyypillinen päästösuuntainen jännitteen pudotus on 2,9 V. Kun virta nousee 1000 mA:n tasolle, on kynnysjännite tuolloin 3,15 V. Maksimivirran 1500 mA:n saavuttaessa kynnysjännite on jo noin 3,15 V. Kuvasta huomataan, että virta kasvaa aluksi melko hitaasti jännitettä kasvattaessa, mutta korkeammilla virroilla jännitteen kasvu hidastuu. [9]

LEDin toiminnan osalta on tärkeää käydä myös puolijohdekomponentin valontuottokyky. LED-komponentin valontuottokyky perustuu elektronien liikkeeseen. Esimerkiksi *p-n*-liitoksinen LED toimii, kun *p*-tyypin aineen aukko täyttyy *n*-tyypin aineen valenssielektronilla ja *n*-tyypin aineen aukko täyttyy *p*-tyypin valenssielektronilla, kun nämä virittyvät sähköä johtamalla. Kuten kuvassa 2.2 on esitetty, elektroni menee *p*-aineen ja *n*-aineen liitoksen läpi täyttöalueelle, joka muodostuu *p*- ja *n*-aineen liitoksen rajapinnan läheisyyteen. Elektronin siirtymisessä syntyy energiaa, joka havaitaan valona. Koko ilmiötä kutsutaan elektroluminesenssiksi. [7]



Kuva 2.2 Elektronin siirtyminen liitoksen läpi ja fotonin syntyminen.

Kuvassa 2.2 mustat pallot kuvaavat elektroneja ja valkoiset pallot elektroniaukkoja. E_c ja E_v kuvaavat p - ja n -tyypin aineiden energiatasoja. Kuvan aaltoileva nuoli kuvaa elektroluminesenssissa syntyvää fotonia. Fotonin energiaa voidaan laskea kaavalla:

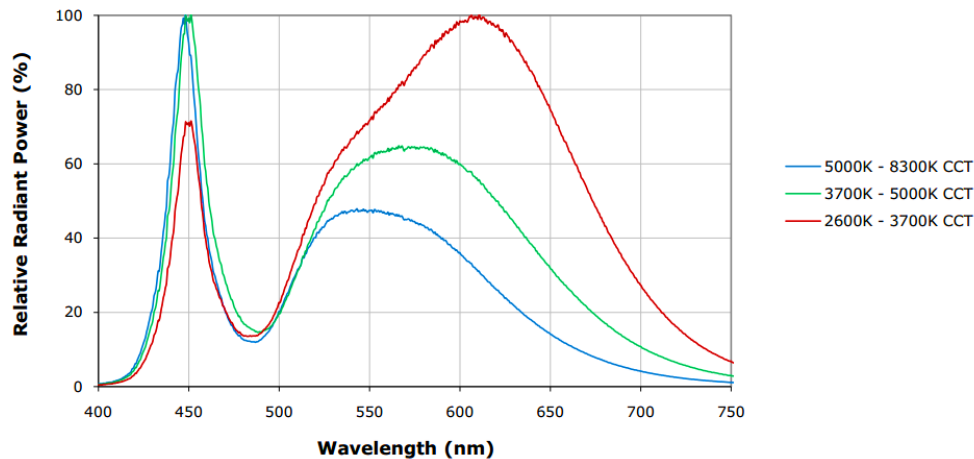
$$E_f \cong qU = hf, \quad (3)$$

missä E_f kuvaa fotonin energiaa, q alkeisvarausta ($1,6 \cdot 10^{-19}$ As), U LEDin päästösuuntaista jännitettä, h on Planckin vakio ($6,626075540 \cdot 10^{-34}$ Js) ja f taajuutta. [8]

Valon säteilyn määreet muistuttavat hyvin paljon radiosäteilyssä käytettäviä suureita. Valon määrää kuvataan usein valovirralla ϕ_v , jonka mittayksikkönä on lumen (lm). Valovoima (Luminous intensity, I_v) voidaan laskea, kun tiedetään valovirta steradiaania kohti (lm = cd · sr). [7]

2.2 LEDin säteilyn värilämpötila

LEDien säteilemä valo riippuu käytetyistä p - ja n -liitosaineista. LEDille tyypillistä on kapea taajuuskaista, joten valkoista valoa halutessa joudutaan hyödyntämään useampaa väriä tuottavia materiaaleja [6]. Näitä yhdistämällä saadaan aikaiseksi leveämpi spektri, jolloin säteilevä alue saadaan säteilemään valkoista valoa. Kuvassa 2.3 on esitetty esimerkkinä Creen valmistaman LED-komponentin suhteellisen säteilyn määrä suhteessa aallonpituuteen. Kuvassa näkyy kolme eri kuvaajaa, joista ylin on 2600–3700 Kelvinin värilämpötilan LED-komponenttien kuvaaja. Keskimäinen on 3700–5000 Kelvinin LED-komponenttien kuvaaja ja alin 5000–8300 Kelvinin LED-komponenttien kuvaaja. Kuvaajat muistuttavat jossain määrin toisiaan ja ovat tavanomaisen valkoisen LEDin spektrin mukaisia.



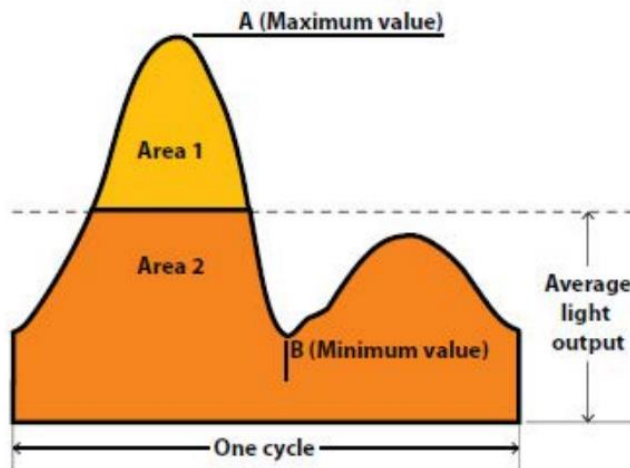
Kuva 2.3 Cree XP-G LEDin suhteellisen säteilyteho suhteessa aallonpituuteen. [9]

Valon väriin voidaan vaikuttaa materiaalivalinnoilla, kuten Galliumarseenia puolijohdema-
teriaalina käyttäen voidaan toteuttaa korkean aallonpituuden infrapunaista säteilevä LED.
Esimerkiksi sinkkiseleenillä voidaan toteuttaa sinistä säteilevä LED. Valkoisena säteilevä
LED voidaan toteuttaa sinistä säteilevällä LEDillä, jossa on keltainen fosforipäällyste. [7]

2.3 Välinkyntä

Valonlähteen fotometrinen välkyntä syntyy valaisimen valovoimakkuuden muutoksista eli
modulaatiosta. Sitä syntyy yleisesti kaikissa valaisintyypeissä, jotka toimivat AC-jännit-
teellä, tai virtalähteistä, jotka tuottavat epälineaarista käyttöjännitettä (rippeli) valaisimelle
[13]. Välkynnälle ei vielä löydy selkeää rajoittavaa vaatimusta, mutta valveutuneet valaisin-
valmistajat ottavat tämän jo suunnittelussa huomioon.

Kuva 2.4 antaa esimerkin valonlähteen välkynnän kuvaajasta. Kuvassa esitetään valaisimen
ulostulon (säteilevän valon) jakson aikaisen kuvaajan esimerkkiä. Kuvassa 2.4 on oranssilla
esitetty *Area 2* on ulostulon keskiarvon alapuolella oleva ala. *Area 1* kuvaa keskiarvon ylä-
puolella olevaa alaa. *A* esittää kuvaajan huippuarvoa ja *B* kuvaajan minimiarvoa.



Kuva 2.4 Valaisimen välkyntää havainnollistava kuvaaja. [13]

Välkyntää mitataan kuvan 2.4 esimerkkikuvaajan symbolien ja alueiden mukaisesti kaavoilla:

Välkyntäprosentti:

$$100 \% \cdot \frac{A - B}{A + B} \quad (4)$$

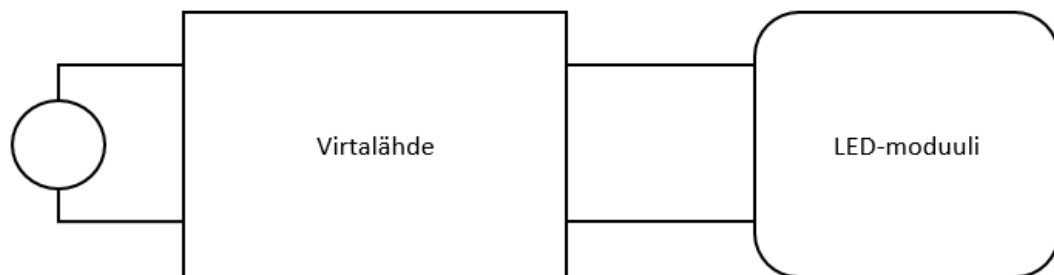
Välkyntäindeksi:

$$\frac{\text{Area 1}}{\text{Area 1} + \text{Area 2}} \quad (5)$$

Välkyntänsä vaikutuksiin on ruvettu kiinnittämään entistä enemmän huomiota, sillä sen on todettu vaikuttavan ihmiseen. Välkyntänsä on tutkittu aiheuttavan pään särkyä, migreeniä, silmien rasitusta ja pahimmillaan epileptisiä kohtauksia. Välkyntä havaitaan alle 100 Hz:n taajuuksilla ja on näkymätöntä yli 500 Hz:n taajuuksilla. Tästä ilmiöstä ei varsinaista standardivaatimusta ole, mutta osa LED-valaisimien ja -virtalähteiden valmistajista on ilmoittanut myös tuotteidensa välkyntäindeksin datalehdissä. [13, 14]

2.4 LED-valaisimen rakenne

LED-valaisimien yleistoimivuuden ja valaisinlaitteiden osien keskinäiseen vaihtokelpoisuuteen tähtäävän Zhaga-standardin mukaisesti integroitu LED-valaisin voidaan jakaa kahteen moduuliseen osaan. Ensimmäinen osa on elektroninen ohjauslaite (engl. Electronic Control Gear). Ohjauslaite on valaisimen virtalähde (kuten kuvassa 2.5 on nimetty), jossa laitteeseen tuleva käyttöjännite (verkkojännite) tasataan ja muunnetaan LED-moduulille sopivalle tasolle. Tässä moduulissa on myös mahdollisesti käytettävä LED-valaisimen ohjaus-elektroniikka. Kuvan 2.5 mukainen toinen osa on LED-moduuli. Tämä voi sisältää yhden tai useamman LED-komponentin, minkä takia moduulin kuorma voi vaihdella. LED-moduuli voi myös sisältää jossain määrin ohjaus-elektroniikkaa tai suojakomponentteja. Kuvassa 2.5 näkyy Zhaga-standardin mukainen LED-valaisimen moduulirakenne, jossa sisääntulojännite muokataan virtalähde-moduulissa ja ulostulojännite on LED-moduulin kuormalle sopiva. [12]

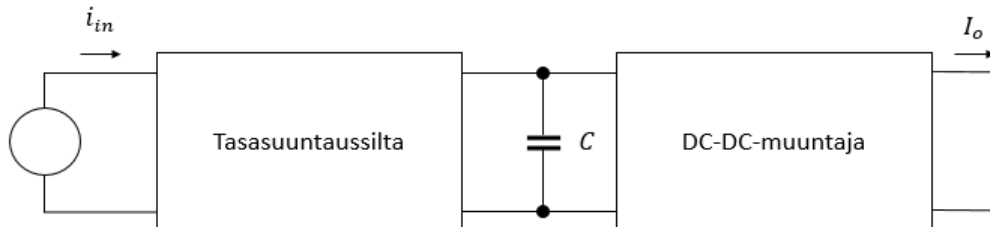


Kuva 2.5 LED-valaisimen yleinen moduulirakenne.

Kuvan 2.5 moduulirakenteen virtalähteessä tai virtalähdemoduulissa tapahtuu myös tarvittavat LED-moduulin säätöön liittyvät toiminnot, kuten himmennuksen ohjaus, mahdollinen ulostulojännitteen korjaus ja häiriönsuojaus verkkoon tai LED-moduulin suuntaan. [11]

2.5 LED-ohjain -topologiat

LED-valaisinmoduulien ohjaus vaatii vakiovirran ohjausta ja DC-tasoista jännitettä. Vaihtojännitteen tasoitus tapahtuu yleisimmin diodisillalla (tasasuuntaussilta, kuvassa 2.6).



Kuva 2.6 Esimerkkikuva LED-ohjaimen rakenteesta.

Kuvassa 2.6 on esimerkkikytkentä LED-ohjaimen rakenteesta. Toteutuksessa on tasasuuntaussilta, suodatuskondensaattori C ja DC-DC -muuntaja, joka muuntaa jännitteen oikealle tasolle.

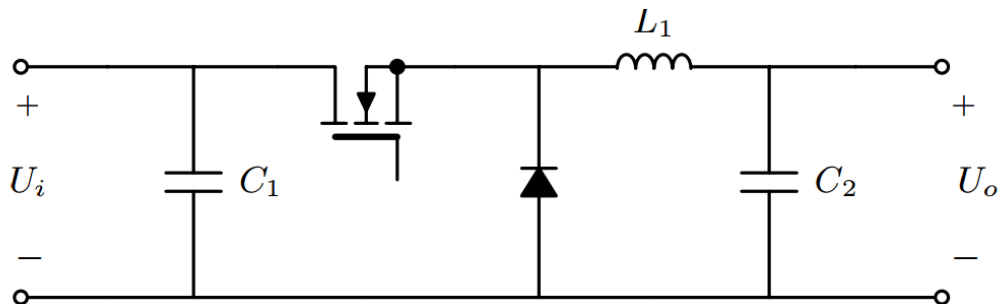
Vaikka yleisin LED-ohjaintopologia on muuntaa verkosta tuleva vaihtomuotoinen jännite tasajännitteeksi, on mahdollista käyttää myös AC-muuntajia LED-ohjaukseen. Tätä ratkaisua on harkittu, sillä tasasuunnatussa LED-ohjaimessa syntyy tehohäviötä, mahdollista häiriötä ja ennen kaikkea laitteen käyttöikä on rajoittunut kytkennässä yleisesti käytetyn elektrolyyttikondensaattorin ikään. Yksinkertaisin AC-muuntaja -malli voi kuitenkin aiheuttaa jonkin verran välkyntää LEDin kynnysjännitteen takia. Hwun & al [15] onnistuivat toteuttamaan AC-muuntajalla toteutetun LED-valaisimen, jonka hyötysuhde saatiin entistä paremmaksi lisäämällä LED-moduuliin ohjauselektroniikkaa.

Virran ohjaus voidaan toteuttaa tasatulla ja sopivaksi muunnetulla jännitteellä ja sarjavesituksella, joka rajoittaa virtaa. Toteutus ei kuitenkaan ole tehonkulutuksen osalta järkevää. Tehonkulutuksen kannalta järkevämät ratkaisut LED-teholähteille ovat lineaaristen virtalähteiden sijaan hakkurilähteet. Yleisiä topologioita näille ovat buck, boost ja invertteri ja flyback. Hakkurilähteiden toiminta perustuu jännitteen katkomiseen. Tämä saa aikaan erittäin hyviä tehohyötysuhteita, mutta harmonisia monin kertoimia syntyy ulostulojännitteeseen katkonaisuuden takia. Harmoniset yliaallot aiheuttavat runsaasti häiriötä sähköverkkoon ja joissain tapauksissa valaisimeen itseensä. Lisäksi hakkurilähteille tyypillinen ulos-

tulon tasajännitteen tason epätasaisuus aiheuttaa joissain tilanteissa myös valaisimen valonlähteen säteilyn epätasaisuutta. Hakkuriteholähdetopologiat voidaan jakaa kahteen eri luokkaan, eristetyt ja ei eristetyt topologiat. [16, 17, 18]

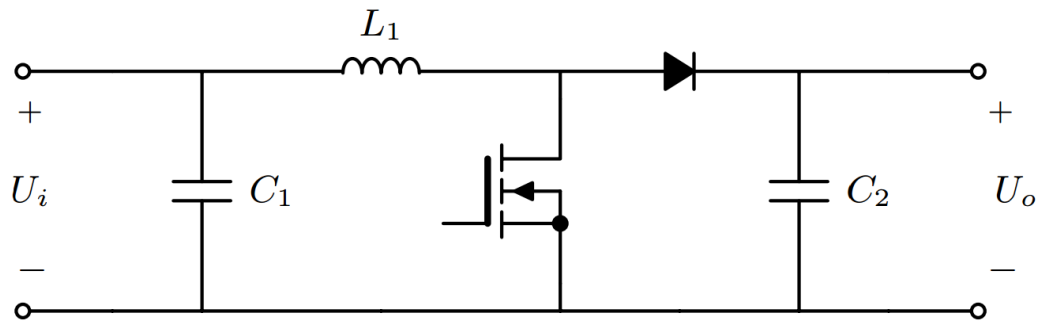
2.5.1 Buck- ja boost- tyyppiset hakkurilähteet

Jännitettä laskeva hakkurivirtalähdemalli, eli buck-hakkuriteholähde, toimii katkomalla jännitettä, jolloin keskimääräinen taso saadaan alaspäin. Buck-topologiaa käytetään tasajännitteen laskemiseen, jolloin jännite saadaan ulostulon kuormalle sopivalle tasolle. Kuvasssa 2.7 on kytkentäkaavio yksinkertaisesta buck-hakkuriteholähteestä. Tulojännitettä (U_i) ohjataan katkomalla jännitettä avaamalla ja sulkemalla MOSFET-transistoria. Kun ”kytkin” on suljettu, jännite pääsee läpi. Kun kytkin on auki, kelan (L_1) indusoitunut virta pääsee purkautumaan ja suuntautuu ulostuloon, diodin päästäessä virtaa vain toiseen suuntaan. Näin ulostulojännite on positiivinen. Tyypillisesti jännitettä laskevat hakkurilähteiden virran aaltoilu on jatkuvaa, eli virran alaraja pysyy nollan yläpuolella. [17, 18]



Kuva 2.7 Esimerkki jännitettä laskevan hakkuriteholähdetopologian piirikaaviosta.

Jännitettä nostava hakkuriteholähdetytkentä (kuva 2.8) toimii nostamalla tasoa ylöspäin hyödyntäen jännitettä laskevan topologian tavoin kytkintä, mutta kytkennässä kela varastoi energian kytkimen ollessa suljettu. Tällöin kelan varastoima energia purkautuu kytkimen auetessa, jolloin kelan (L_1) energia nostaa jännitettä sisääntulojännitteen päälle. Näin lähtöjännite on sisääntulojännitteen ja kelan varastoiman energian summa. [17, 18]

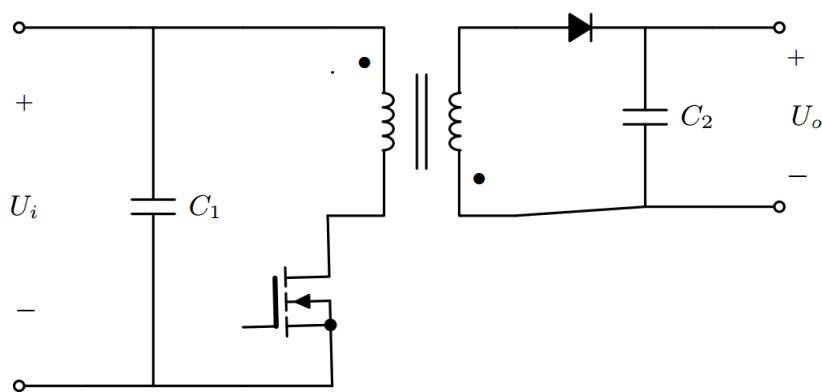


Kuva 2.8 Esimerkki jännitettä nostavan hakkuriteholähdetopologian piirikaaviosta.

Jännitettä nostava hakkuriteholähdetopologian virran aaltoilu on tyypillisesti epäjatkuvaa, eli virta käy hetkellisesti nollassa. Jännitettä nostavaa ja laskevaa eristämätöntä kytkentätopologiaa kutsutaan invertteriksi tai buck-boost-hakkuriteholähteeksi. Kirjallisuudessa käytetään myös flyback-hakkuriteholähde -nimitystä ja toimintatopologiat muistuttavatkin hyvin paljon toisiaan. [18]

2.5.2 Flyback-tyyppinen hakkuriteholähde

Kuvassa 2.9 näkyy jännitettä nostavan ja laskevan hakkuriteholähdetyypin esimerkkikytkentä. Kuten boost-topologialla toteutetussa kytkennässä, energiaa indusoituu muuntajaan. Muuntajan napaisuudet on käännetty, joten jännite tulee positiivisena lähtöön. [18]



Kuva 2.9 Esimerkki galvaanisesti erotetun flyback-hakkuriteholähteen piirikaaviosta.

Kytkimen ollessa kiinni, siirtyy sisääntulojännite diodin läpi ulostuloon. Kun kytkin on auki, siirtyy muuntajaan indusoitunut virta ulostuloon. Kytkennän etuna on galvaaninen erotus,

mikä lisää turvallisuutta. Kytkemällä muuntajan ensiön puolelta kanavatransistorin nielusta (*drain*) toision diodin tuloon kondensaattorin ja transistorin lähdöstä toision miinusnapaan saadaan vähennettyä mahdollista kanavatransistorin kytkemisestä syntynyttä ”soimista”. Tällä ratkaisulla toteutettu kytkentä on nimeltään SEPIC-muuntaja. SEPIC on käytännössä jännitettä nostavan topologian ja jännitettä laskevan sekä nostavan topologian yhdistelmä. [18]

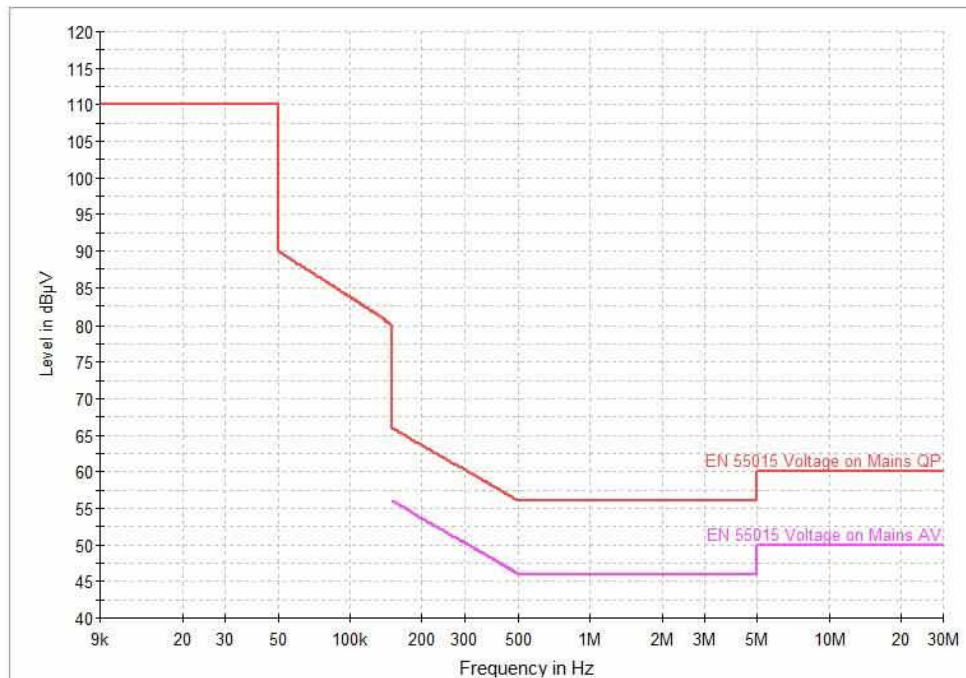
2.6 Valaisimen standardit ja vaatimukset

Kansallisella tasolla LED-valaisimiin liittyvät standardit ovat Suomen standardisoimisliiton SFS Ry:n ja SESKO ry:n julkaisemia asetuksia, jotka perustuvat kansainvälisen sähköalan standardisoimisjärjestön IEC:n ja Euroopan Cenelec:n julkaisemiin standardeihin. Standardit eivät aina ole velvoittavia tai pakollisia tuotteille. Ne ovat yhteisesti laadittuja suosituksia, joiden tarkoitus on lisätä turvallisuutta, suojella ympäristöä ja helpottaa yhteensopivuutta sekä kansainvälistä kaupankäyntiä. Moni standardi on kuitenkin sisällytetty EU:n lainsäädäntöön ja sitä kautta lisätty myös kansalliseen lainsäädäntöön, jolloin standardista on tullut velvoittava ja se on pakko huomioida tuotekehityksessä. LED-valaisimia koskevat standardit on koottu SFS:n käsikirjoihin 651-1 [11] ja 651-2 [4].

EcoDesign -direktiivi 2009/125/EC (ErP) kuuluu muun muassa valaisinten tuotesuunnittelua koskeviin velvoittaviin direktiiveihin. Se asettaa vaatimukset energiatehokkuudelle ja ekologisuudelle tuotteissa ja palveluissa. Tämä direktiivi sisältää käytännössä WEEE-direktiivin 2002/96/EY, jossa määritellään sähkö- ja elektroniikkalaitteiden tuotannossa ja käytössä syntyvää jätettä ja sen vähentämistä, sekä RoHS-direktiivin 2002/95/EY, jossa kielletään eri myrkyllisten ja haitallisten aineiden käytön elektroniikkalaitteissa. Toinen myös velvoittava ja huomioitava direktiivi on Pienjännitedirektiivi 2006/95/EY, jossa on määriteltä turvallisuuksivaatimukset sähkötoimisille laitteille. Pienjännitedirektiivin mukaiset sähköturvallisuuteen liittyvät vaatimukset on lisätty myös kansalliseen lainsäädäntöön sähköturvallisuuslaissa ja sähköturvallisuusasetuksessa. Kolmas EU:n asettama velvoittava direktiivi on Direktiivi sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta 2004/108/EY (EMC), jossa määritellään vaatimukset sähkömagneettisen häiriön aiheuttamiselle ja sen sietokyvyille. [1, 5]

2.6.1 LED-valaisimista ja lisälaitteista aiheutuvat johtuvat häiriöt ja rajat

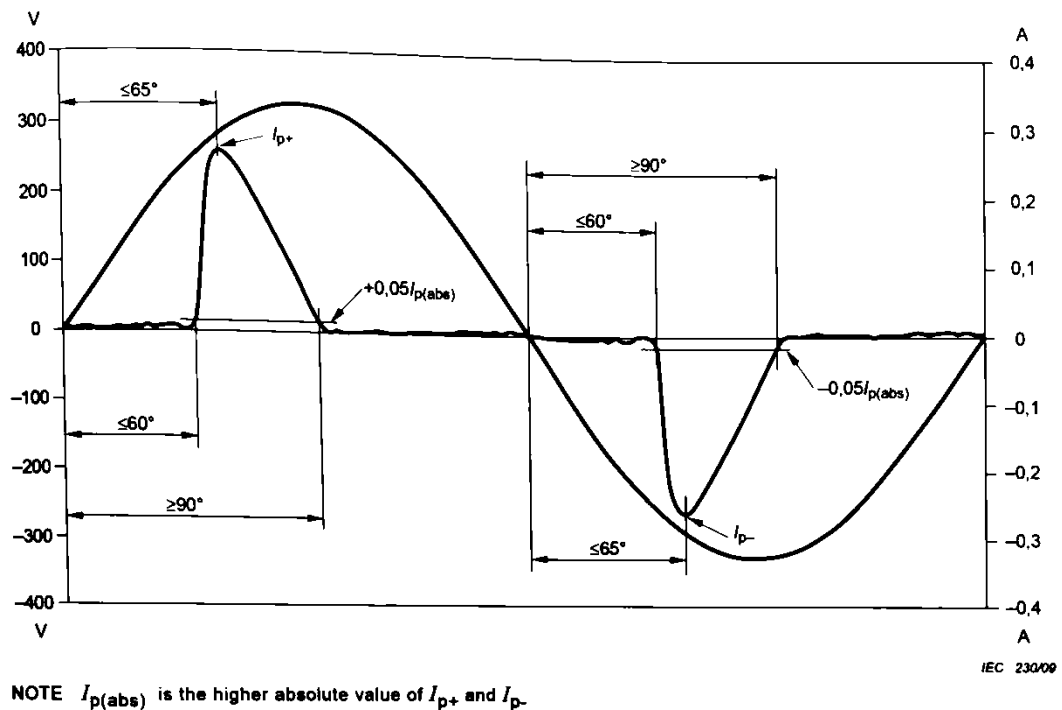
IEC on asettanut standardina LED-valaisimille ja lisälaitteille johtuvien sähköisten häiriöiden rajat. [4, s.33] Syntyvän häiriön rajat on esitetty kuvassa 2.10, jossa x-y-koordinaatissa on näennäiselle hetkellisarvolle jännitteen huippuarvolle (dB μ V) taajuuden (Hz) suhteen (punaisella) sekä jännitteen keskiarvolle (dB μ V) taajuuden (Hz) suhteen.



Kuva 2.10 IEC EN55015:2006 asettamat rajat johtuville vuodoille. [19]

Matalien taajuuksien (0–50 Hz) rajat hetkellisarvoille ovat 110 dB μ V. Välillä 50 Hz:stä 150 kHz:iin raja laskee lineaarisesti taajuuden logaritmin suhteen 90 dB μ V:sta 80 dB μ V:iin. 150 kHz:stä 0,5 MHz:n hetkellisarvo laskee lineaarisesti taajuuden logaritmin suhteen 66 dB μ V:sta 56 dB μ V:iin. 0,5 MHz:stä 5 MHz:iin hetkellisarvon raja pysyy 56 dB μ V:ssa ja 5 MHz:stä 30 MHz:iin hetkellisarvon raja on 60 dB μ V. Jännitetason keskiarvon raja (violetti) taas laskee lineaarisesti taajuuden logaritmin suhteen 150 kHz:n ja 0,5 MHz:n välillä 56 dB μ V:sta 46 dB μ V:iin. 0,5 MHz:n ja 5 MHz:n välillä keskiarvon raja pysyy 46 dB μ V:n tasolla ja 5 MHz:stä 30 MHz:n jännitteen keskiarvon tason raja pysyy 50 dB μ V:ssa. [4]

Valaisinlaitteiden toiminnasta annetaan myös vaatimuksia IEC:n standardissa EN 61000-3-2, jossa käydään läpi rajoitukset johtuville harmonisille virroille. Tässä on esitetty rajoitukset erikseen LED-valaisinlaitteille, joilla aktiivinen sisääntuloteho on suurempi kuin 25 W, sekä laitteille, joilla aktiivinen sisääntuloteho on pienempi tai yhtä suuri kuin 25 W. Standardin osalta keskityttiin 25 W ja pienempiin aktiivisiin sisääntulotehoihin, sillä testattavat laitteet kuuluvat kaikki tähän kategoriaan. Standardi EN 61000-3-2 vaatii alle 25 W laitteiden täyttävän joko taulukon 1 mukaiset harmonisten virtojen rajat tehon suhteen tai kuvan 2.11 mukaisen virran kuvaajan maksimirajan. Lisäksi standardissa mainitaan, että jos testattava laite sisältää sisäänrakennetun himmentimen, tulee laite testata maksimikuormalla. [4]



Kuva 2.11 Harmonisten virtojen maksimikuvaaja ajan suhteen. [4]

Kuvassa 2.11 on kuvattu standardin 61000-3-2 mukainen sisääntulojännitteen kuvaaja, joka on verkkojännitteen aallon kokonainen jakso. Jännite on kuvattu jakson asteiden suhteen. Aallon huippuarvo on 325 V, eli tehollisarvona 230 V. Verkkojännitteen jakson pituutta ei ole tarkkaan ilmaistu, mutta voidaan olettaa sen olevan 20 ms ja taajuuden olevan 50 Hz. Kuvassa 2.11 näkyy käyttöjännitteen jakson lisäksi laitteen virran kuvaaja, jonka taulukko löytyy kuvan oikealta laidalta. Kuvaajan pisteet on kuvattu jakson asteiden suhteen. Kuvaaja antaa virran rajaksi noin 0 mA jännitteen noustessa jakson alusta 60 asteeseen asti.

Virran kuvaaja saa nousta 60 ja 65 asteen välillä huippuunsa. Virran kuvaaja saavuttaa huipunsa 65 asteen kohdalla ja laskee tästä alas. Virran tulee laskeutua alas 90 asteen kohdalla tai aikaisemmin, jolloin virran tulisi olla $+0,05I_{p(abs)}$:n tasolla. $I_{p(abs)}$ on kuvan mukaisesti absoluuttinen virran nollakohta, I_{p+} huippuarvo ja I_{p-} minimiarvo. Jakson toisella puoliskolla jännitteen ja virran kääntyessä negatiiviseksi, samat määritelmät toistuvat kuvaajassa, mutta peilikuvana vaaka-akselin suhteen. Rajat ovat (laskettuna jakson puolivälistä) 60 ja 90 asteen välissä ja huippuarvo (minimi I_{p-}) on saavutettu 65 asteen kohdalla.

Taulukko 1 määrittelee toisen mahdollisen rajoituksen standardin mukaisille virran harmonisille. Taulukossa esitetään virran parittomien harmonisten kerroin ja sallittu maksimiarvo harmoniselle virralle tehon suhteen.

Taulukko 1. Rajat harmonisille virroille (EN 61000-3-2).

Harmoninen kerroin (n)	Sallittu maksimiarvo harmoniselle virralle tehon suhteen (mA/W)
3	3,4
5	1,9
7	1,0
9	0,5
11	0,35
$13 \leq n \leq 39$ (vain parittomat harmoniset)	$\frac{3,85}{n}$

Taulukossa 1 esitetyt arvot ovat 3. harmoniselle monikertoimelle 3,4 mA/W, 5. kertoimelle 1,9 mA/W, 7. kertoimelle 1 mA/W, 9. monikertoimelle 0,5 mA/W ja 11. kertoimelle 0,35 mA/W. Viimeinen määritelty arvo taulukossa on parittomille harmonisille välillä 13...39. Tämän alueen maksimiarvot on määritelty laskukaavalla, joka muuttuu harmonisen kertoimen suhteessa, kuten taulukossa on esitetty.

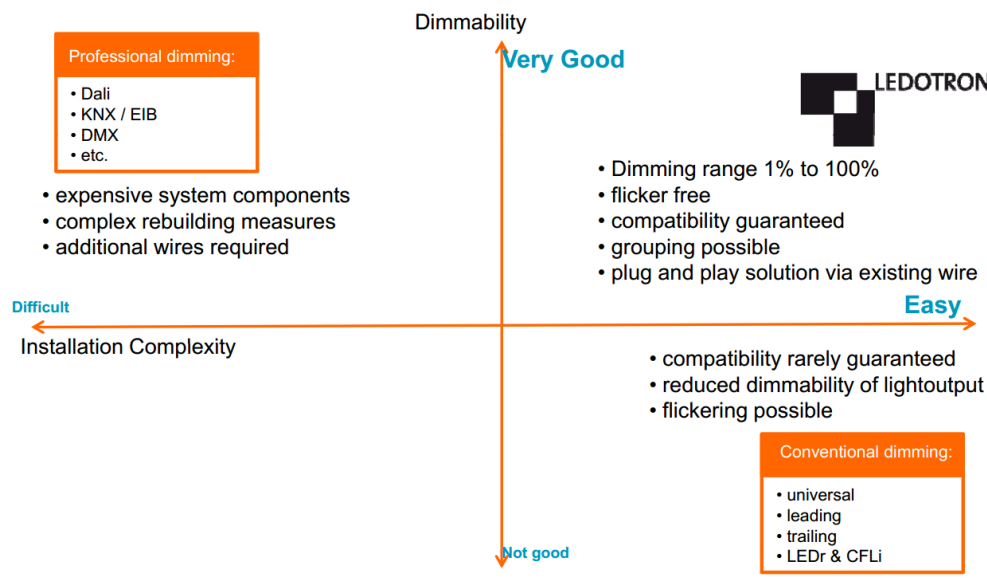
3 VALAISIMEN HIMMENNYS- JA OHJAUSPROTOKOLLAT

Himentimiä on käytetty valaistuksessa 1970-luvulta asti [3]. Himmennyksen ja valon ohjaus kiinteistöissä on koettu tärkeäksi toiminnallisista, energiataloudellisista ja esteettisistä tarpeista johtuen [20]. Hehku- ja halogeenilampuille toteutettu himmennysratkaisu vaati yksinkertaisen seinään asennettavan himmenninyksikön. Perinteisen himmentimen topologia perustuu usein amplitudin tai vaiheen leikkaukseen. Hehkulampuille alun perin kehitetty valaistuksen himmennys on tärkeä osa valaisinmarkkinoita ja se on vakiinnuttanut paikkansa sisävalaistuksen ominaisuutena. [2]

Yleisin käytetty topologia sisävalaisimien kirkkaudensäädössä on vaiheen leikkaus, jossa verkkojännitteen aaltomuodon nousevaa tai laskevaa reunaa leikataan. Nousevan reunan leikkauksesta käytetään nimitystä LEDIM, joka on usein toteutettu Triac-topologialla. LEDIM on yleinen erityisesti Pohjois-Amerikassa. Euroopassa taas on vakiintunut TEDIM, laskevan reunan leikkaus, joka on toteutettu huomattavasti monimutkaisemmalla aktiivipiirillä. Vaiheen leikkaus aiheuttaa ongelmia LED-valaisinratkaisuja käytettäessä. Himmennys toimii joillakin LED-valaisin -topologioilla, mutta usein himmentäessä LED-valaisin sammuu tai välkkyä (flicker) 10–20 %:n voimakkuuden alueella. Tämä aiheutuu LED-ohjaimen virtalähteen minimijännite-rajoista. [2]

LED-valaisinten yleistyessä valmistajat ovat luoneet useita vaihtoehtoratkaisuja korvaamaan perinteisen himmennysratkaisun. Analogisen ohjauksen rinnalle on tullut digitaalinen himmennys, jossa konkreettinen himmennys tapahtuu valaisimen ohjauspiirissä ja katkaisijan kirkkaudensäätäjä lähettää digitaalisen käskyn valaisimelle muuttaa kirkkautta. [3]

Kuvassa 3.1 esitetään eri himmennysratkaisuja, jotka on sijoitettu kuvaajalla himmentyvyyden ja asennettavuuden suhteen. Helposti asennettavia, mutta epävarmoja ratkaisuja himmentymisen suhteen ovat verkkojännitteen vaiheen leikkaukseen ja amplitudin leikkaukseen perustuvat himmennystopologiat. Tunnetuimpia digitaalisia himmennys-protokollia ovat DALI-, KNX-standardit ja esitysteknologian puolelta DMX-standardi. Kuvassa 3.1 esitetään himmennuksen osalta parempia digitaaliseen kirkkauden säätöön perustuvia ratkaisuja, kuten DALI ja KNX. Kyseisten protokollien asennus ei kuitenkaan ole helppoa, sillä digitaalinen signaali vaatii oman signaaliväylän, eli oman kaapelin asennuksen kohteeseen. DALI ja KNX kumpikin vaativat tiedonsiirtoon oman kaksijohtoisen signaaliväylän virtakaapelin rinnalle.



Kuva 3.1 Himmennys-topologiat: Himmennyksen toimivuus ja asennettavuus. [21]

Kuvassa 3.1 kuvaajalla parhaiten sekä himmennettävyyden että asennettavuuden osalta toimii Ledotron eli Digital Load-Side Transmission, jolla voidaan lähettää ohjaussignaali verkkojännitteeseen moduloituna. Näin asennukseen ei tarvita omia datakaapeleita ja DLT on ohjelmoinnin osalta asennuksen jälkeen käyttövalmis. Erityisen merkittävää on myös DLT:n himmennysalue, joka on 1...100 %:n välillä. [5, 21]

Vuoden 2009 Euroopan komission päätöksellä energiatehokkuudeltaan huonojen kotitalouslamppujen markkinoille tuominen kiellettiin [22]. Hehku- ja halogeenilamppujen vaihtuminen uusiin valaisintyypeihin aiheutti toiminnan epävarmuutta perinteisissä himmentimissä. Ratkaisuksi Insta ja Osram kehittivät lisenssi-vapaan kansainväliseksi standardiksi tarkoitetun valaisinten digitaalisen himmennys- ja ohjausprotokollan, jonka nimeksi vaikiintui LEDOTRON. [3]

3.1 DLT-protokollan esittely

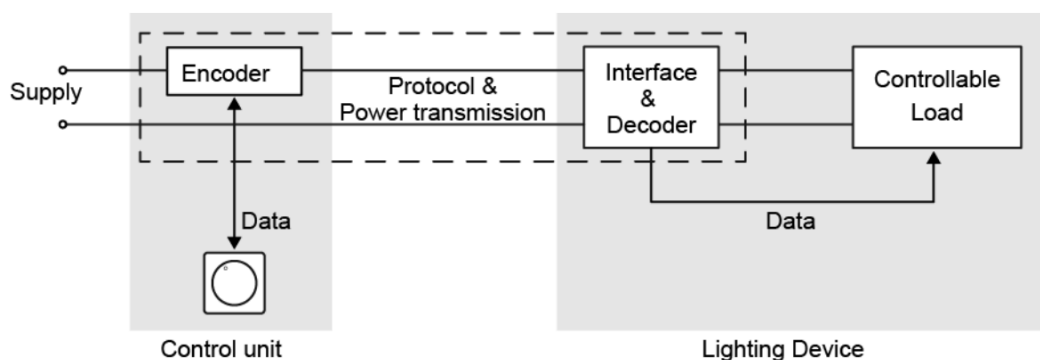
Digital Load-Side Transmission Lighting Control (DLT) tai markkinatermein LEDOTRON on protokolla, joka on kehitetty helpottamaan yhteensopivuusongelmia ja olemaan helposti asennettava valaisinten himmennys- ja ohjausprotokolla. DLT:ssä on lisäksi optio valon väriohjaukseen, värilämpötilaohjaukseen ja valaisinryhmäohjaukseen.

Digital Load-Side Transmission perustuu tulevaan IEC 62756 -standardiin ja toiminta on EN 61000-3-2 -standardin sekä EN 55015 -standardin mukainen, eli EMI- ja EMC-yhteensopiva.

DLT sisältää ohjausyksikön ja valaisinlaitteen. Protokollan mukaisen laitteen voi asentaa 2-johtimisen valaisinhimentimen paikalle. Se vaatii himmentimen lisäksi DLT-yhteensopivan valaisinlaitteen. Perinteisellä valaisinlaitteella DLT-ohjaussignaali ei kuitenkaan aiheuta häiriötä tai toiminnan epävarmuutta. Perinteinen valaisin ei toimi DLT-himmennyksellä, mutta katkaisu onnistuu normaalisti. [23]

DLT perustuu kantataajuuskaistan datan modulaatioon AC-verkkojännitteen nollanylitystä hyödyntäen. Se poikkeaa muista PLC-protokollista matalalla tiedonsiirtonopeudella ja muistuttaa hyvin paljon UPB-tiedonsiirtoprotokollaa, jossa myös viestisignaali moduloidaan AC-jännitteen siniaallon laskevalle reunalle. Kun tavalliset PLC-ratkaisut pystyvät 10–100 Mb/s nopeuksiin, DLT-viestin siirtonopeus on 200 b/s. DLT-protokolla on tarkoitettu vain valaisinten ohjaukseen, kuten himmennykseen tai värisäätöön ja tarvetta suuren datan siirtämiseen ei ole. Pienellä siirtonopeudella saavutetaan matalat taajuudet moduloinnissa ja tämä parantaa huomattavasti häiriönsietokykyä. Varsinkin LED-vakiovirtaohjaimista syntyvät yliaallot aiheuttavat sähköverkkoon häiriösignaalia perinteisen PLC:n toimintataajuuksille. [23]

Kuvassa 3.2 on esitetty DLT-protokollan fyysisten laitteiden kaavio ja toimintatopologian periaatteet. Kuvassa näkyy ohjausyksikkö, kaksi siirtojohtinta ja itse valaisinlaite.

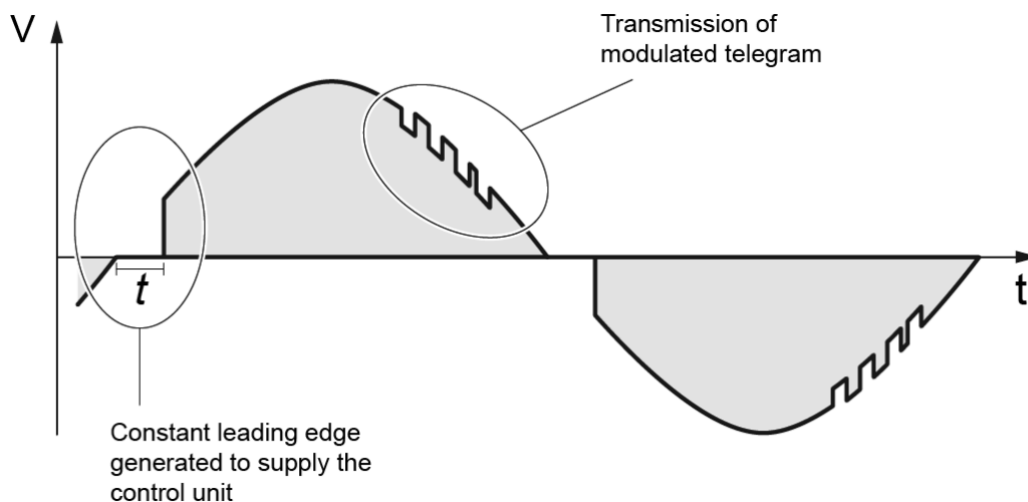


Kuva 3.2 Ohjainyksikkö ja valaisinyksikkö DLT-protokollassa. [3]

DLT toimii lähettämällä ohjaussignaalia ohjainyksiköstä valaisimeen. Signaali moduloidaan sähköverkon 50 Hz:n kanta-aaltoon ja data kulkee aallon laskevalla harjalla. Valaisinyksikkö

ottaa verkkojännitteestä käyttöjännitteensä ja demoduloi ohjainyksikön lähettämän data-signaalin. Dekoodattu DLT-viestin informaatio sisältää käskyt, joiden mukaan ohjattava kuorma toimii. DLT-protokollassa ohjainyksikkö lähettää vain digitaalista viestiä, eikä näin ollen toimi analogisissa himmenninratkaisuissa.

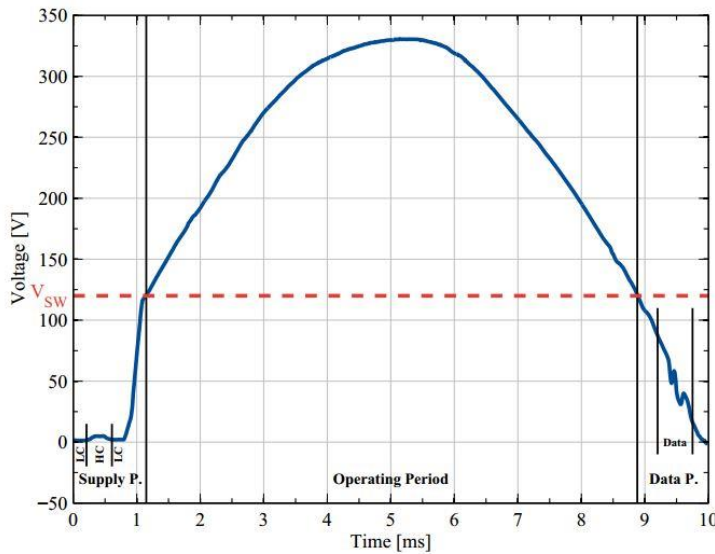
Ohjainyksikkö ottaa käyttöjännitteensä verkkovirrasta. Tästä syystä, kuten kuvassa 3.3 näkyy, t pituinen jakson osa aallonpuolikkaan nousevasta ja laskevasta reunasta leikkaantuu.



Kuva 3.3 DLT:n aaltomuoto. [3]

DLT-viesti taas sijaitsee kantoaallon laskevalla reunalla, mikä toistuu jokaisella aallon puolikkaalla. Kantoaallon aallonpituuden kesto on 20 ms, johon varsinaisia informaatiobittejä on standardissa määritelty 4.

Kuvassa 3.4 on todellinen näyte valaisinohjauksen sisääntulosta mitattu signaalin aaltomuodosta. Puolikkaassa aallonpituudessa on havaittavissa ohjausyksikön leikkaus, joka on jaettu kolmeen osaan. Leikkaantunut reuna on noin 1 ms koko puolikkaasta aallosta (10 ms). DLT-viesti on puolikkaan jakson laskevalla reunalla ja kestoltaan 0,5 ms.



Kuva 3.4 Ohjausyksikön DLT-signaalin aaltomuoto verkkojännitteessä. [23]

DLT-ohjausyksikkö leikkaa aaltomuodon nousevasta reunasta oman käyttöjännitteensä, joka näkyy kuvassa 4.4. Leikkaus on jaoteltu ohjainyksikön toimintatopologian osalta *LC* ja *HC* osiin. *LC* viittaa matalavirtaiseen (Low Current) ja *HC* korkeavirtaiseen (High Current) osioon. Ohjausyksikön käyttöjännitteen osalta tärkeä *HC*-osio alkaa 300 μ s:n kohdalla ja päättyy 700 μ s:n kohdalla, kun ajan laskenta aloitetaan verkkojännitteen nollanylityksestä. DLT-standardissa *HC*-osiossa lisälaitte saa käyttää virtaa maksimissaan 350 mA tällä ajanjaksolla. DLT-standardi sallii tälle jaksolle maksimissaan 20 V:n jännitetason laskun sarjaan kytketylle valaisinlaitteelle. [23]

Annetuilla LED-lisälaitteen virta ja jänniterajoilla saadaan DLT-standardin sallimat maksimienergia-arvojen yhtälöt [24]:

$$\begin{aligned}
 W_{CD,max} &= \int_{t_1}^{t_2} U \cdot \sin(2\pi f t) \cdot I_{max} dt \\
 &= \int_{300 \mu s}^{700 \mu s} \sqrt{2} \cdot 230 \text{ V} \cdot \sin(2 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot t) \cdot 350 \text{ mA} dt \\
 &= 7,12 \text{ mJ}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Sekä 20 V:n tason pudotuksella:

$$W_{CD,min} = 4,32 \text{ mJ} \tag{7}$$

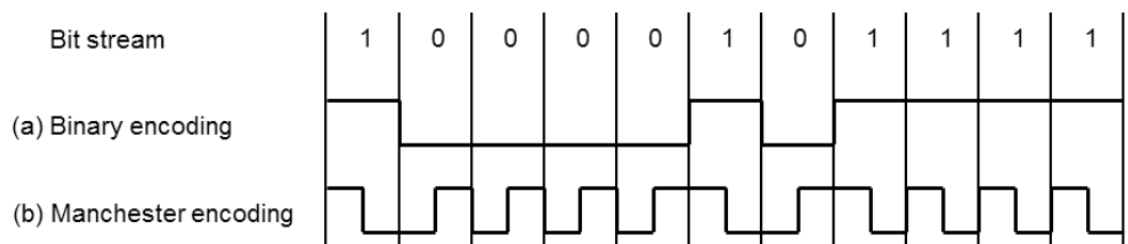
DLT-standardin ohjausyksikölle sallitut käyttötehon keskiarvot ovat tällöin:

$$P_{CD,max} = 712 \text{ mW ja } P_{CD,min} = 432 \text{ mW} \quad (8)$$

Määritellyt rajat antavat raamit LED-valaisimen oheislaitteille, kuten integroiduille langattomille ohjausmoduuleille. [24, 25]

3.2 Manchester-koodaus

DLT-protokollan viesti käyttää Manchester-linjakoodausta. Tällä pyritään parantamaan tietoliikenteen virheidensietokykyä. Manchester-koodaus mahdollistaa datasiirron kellotaajuuden lähettämisen viestissä ja tarjoaa aina 50 %:n DC-tason keskiarvon signaalin huippu-arvosta. Kuten kuvassa 3.5 esitetään, jokainen databitti sisältää tässä linjakoodauksessa 2 puolibittiä. [3]



Kuva 3.5 Manchester-koodauksen kuvaaja. [26]

"1"-bittiä vastaa laskeva muutos eli puolibitit {1,0} ja "0"-bittiä nouseva muutos {0,1}. Kun koodaus perustuu jännitetason muutokseen, ei ole tilannetta, jossa kaksi puolibittiä olisivat samat. Tämä mahdollistaa kellon tuomisen koodin mukana, sillä vastaanottava laite voi tunnistaa tilan muutoksen ja laskea sen mukaan kellotaajuuden ja tunnistaa lähetetyt informaatiobitit.

3.3 Viestirunko

DLT viesti koostuu useista kehyksistä. Jokainen aallon puolikas sisältää data-kehysten ja 4 puolibittiä, yhteensä 6 puolibittiä. Jokaista kehystä edustaa 2 puolibittiä, jotka sijaitsevat

alussa ja lopussa. Kehyksen puolibiteistä ensimmäinen on aina "1" ja viimeinen "0". Kehyksen sisällä olevat 4 bittiä ovat Manchester-koodattuja ja siksi kokonaisuudessaan informaatiobittejä on vain 2.

DLT-viesti sisältää taulukon 2 mukaiset osiot. Ensimmäinen osio sisältää viestin aloituskehyksen, eli SoT:n (Start of Telegram), jossa databitit ovat kumpikin ylhäällä. Osio 2 sisältää valaisinryhmän tiedon. Ryhmiä on mahdollista määrittää 3 ja 0-ryhmä käsittää kaikki ryhmät.

Taulukko 2. DLT-viestin osiot ja sisältö.

Osio	Nimi	Puolibittien lukumäärä
1	Viestin aloitus-kehys (SoT)	4 (kaikki ylhäällä)
2	Ryhmän numero	4 (2 databittiä)
3	Viestin tyyppi (tila)	6 (3 databittiä)
4	Pariteetti	2 (1 databitti)
5	Tietosisältö	riippuu viestin tyypistä

Taulukon 2 mukaisesti DLT-viestin osio 3 määrittää viestin tyyppin. Tämä osio sisältää 3 bittiä ja mahdollisia tiloja on yhteensä 8 kappaletta. Taulukon 2 osio 4 sisältää pariteettibitin. Osio 5 sisältää viestin tietosisällön, joka vaihtelee pituuksiltaan riippuen viestin tyypistä. DLT-viestin aloituskehyksen ja ryhmämäärittelyn jälkeen tulevalle viestin tyyppille on annettu standardissa määrittelyt, jotka on esitelty tarkemmin taulukossa 3. [3]

Ryhmä-tilassa on varattu 2 bittiä määrittelemään ryhmä. Ryhmämahdollisuuksia on 4, joista 0-osoite on automaattisesti määritelty ryhmä, joka käsittää kaikki valaisimet. Vaihtoehdot 1...3 ovat mahdollisia valittavia ryhmiä.

DLT-viestin tila määrittää viestin tyyppin ja sen sisällön. Taulukossa 3 on esitelty DLT-tilat, niiden numerot ja niiden soveltuvuus eri laitteille. Oletustila on viestissä "himmennys", joka on määritelty ensimmäiseksi tilaksi. Oletustilassa, eli ensimmäisessä tilassa, 0 siirrytään valon kirkkauden säätöön viestin tietosisällön mukaisesti. Tiloissa 1 ja 2 siirrytään värihallinta-tiloihin. Tila 5 on varattu valaisinryhmä-ohjaukselle, jolla voidaan ohjata DLT-viestin ohjaus useampaan osoitteeseen useammalle valaisimelle yhtä aikaa. [3]

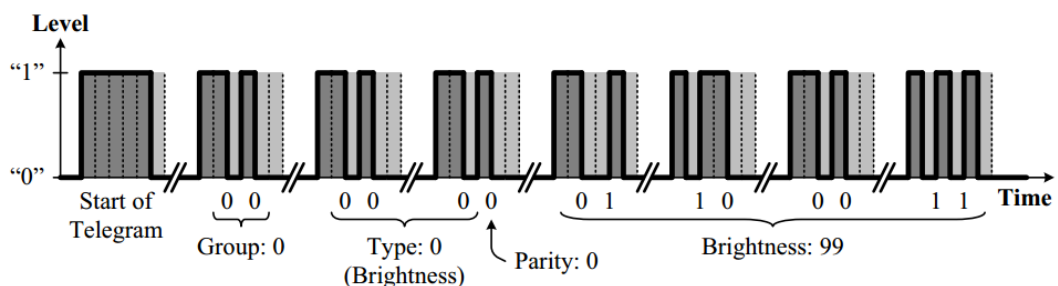
Taulukko 3. DLT-tilat, tyypit ja niiden soveltuvuus.

Numero	Tila (mode)	Soveltuvuus laitteille
0	Himmennys	CFLi, valkoinen LED
1	Väriämpötilan säätö	RGB-LED
2	Väriin säätö	RGB-LED
3	Määrittelemätön	
4	Määrittelemätön	
5	Ryhmäohjaus	Ryhmäominaisuus
6	Valmistajan määrittelemä viesti	
7	Varattu viestin pidennyksille	

Taulukossa 3 tilat 3 ja 4 ovat vielä määrittämättömiä, mutta ovat määriteltävissä. Tila 6 on määritelty valmistajan itsensä määrittelemäksi tilaksi ja tila 7 on varattu viestin (telegram) pidennyksille.

Viimeiset osiot sisältävät pariteettibitin, sekä itse tietosisällön. Tietosisällön pituus riippuu viestin tyypistä. Valaistuksen kirkkaus on mahdollista säätää 255 askeleella (8 bittiä). RGB-LED -valaisinten väriohjaus on mahdollista ohjata x- ja y-koordinaatistolla, jossa molemmalla akselilla on 4095 askelta (64 bittiä) tai väriämpötilan mukaan.

Kuvassa 3.6 on esimerkki DLT-viestistä siirtolinjassa. Signaali on osioitu puolialtoon mahdaviin databitteihin (6 puolibittiä kantoaallon puolikasta kohti). Kuviossa on taulukon 1 mukaisesti osiot.

**Kuva 3.6** Esimerkki DLT-viestisignaalista. [23]

DLT-viesti alkaa kuvassa 3.6 SoT-osioista, jossa kehyksen muodostavat ensimmäinen ja viimeinen puolibitti. Kehykset toistuvat jokaisessa osiossa. 4 puolibittiä dataa SoT:ssä ovat

aina ”ylhällä”. Kuvan 3.6 toinen osio sisältää ryhmämääritelmän. Tässä tapauksessa $\{0,0\}$, joka viittaa yleiseen ryhmään 0. Seuraavat osiot ilmoittavat viestin tyyppin, jolle on varattu 6 puolibittiä, eli 3 informaatiobittiä. Pariteettibitin jälkeen seuraavat osiot sisältävät kuvassa 3.6 tiedon kirkkaudesta, jolle on varattu 8 informaatiobittiä (255 askelta).

Teoreettinen tiedonsiirtonopeus saadaan, kun lasketaan 50 Hz:n verkkojännitteen taajuudella olettaen, että jokainen sinimuotoisen kantoaallon puolialto sisältää 2 bittiä viestiä. Kantoaallon jakson ajallinen kesto saadaan kaavalla:

$$f = \frac{1}{T} \rightarrow T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \text{ Hz}} = 20 \text{ ms}, \quad (9)$$

jossa f on taajuus ja T on jakson aika. Puolikkaan jakson pituus on siis 10 ms, joka sisältää DLT-moduloinnilla 2 bittiä dataa. Tiedonsiirtonopeus DLT:lle on siis:

$$R_b = \frac{1}{T_b}, \quad (10)$$

jossa R_b on siirtonopeus ja T_b siirretyn bittimäärän aika. Tässä tapauksessa saadaan:

$$R_b = \frac{2 \text{ b}}{10 \text{ ms}} = 200 \frac{\text{b}}{\text{s}}, \quad (11)$$

Tiedonsiirtonopeus on siis 200 b/s DLT-viestillä. Tällä nopeudella esimerkiksi kuvassa 3.6 ollut himmennysviesti kestäisi:

$$T_b = \frac{16 \text{ b}}{200 \text{ b/s}} = 80 \text{ ms}, \quad (12)$$

jossa T_b on viestibittien siirtoon käytetty aika. Teoreettinen himmennysviestin pituus on 80 ms. Lopulliseen viiveeseen himmennysviestin osalta vaikuttaa viestin pituuden lisäksi valaisinohjaimen demoduloinnissa aiheutuva viive.

5 LED-OHJAINPIIRI IW6401

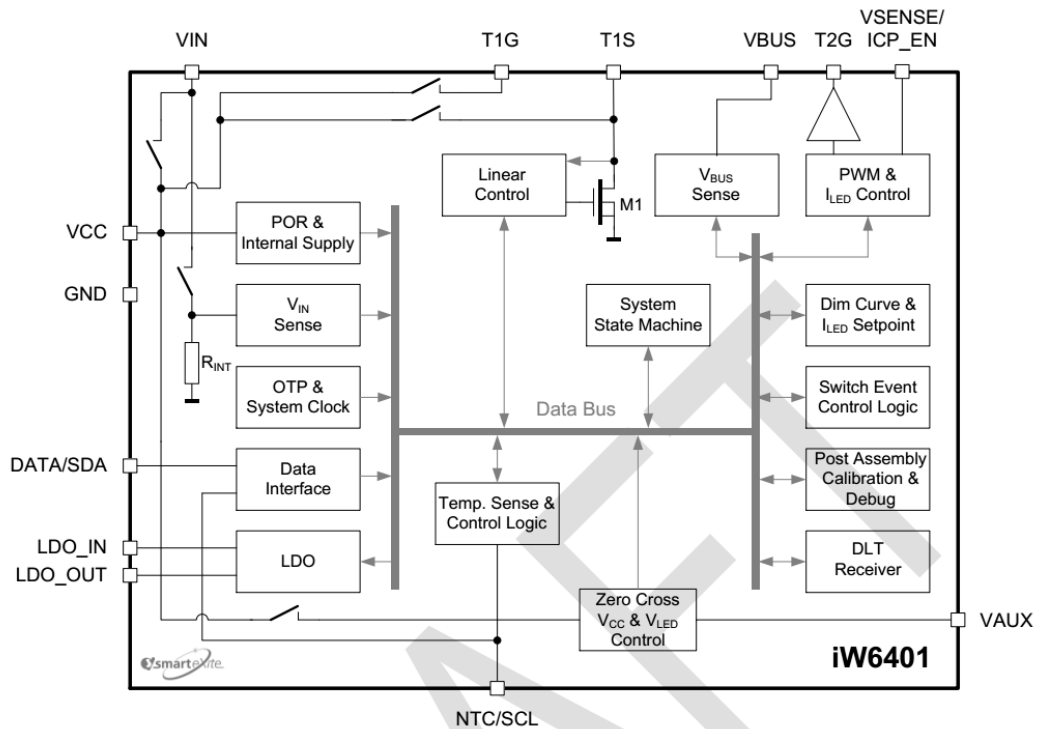
iW6401 on LED-valaisinten vakiovirtaohjaimien ohjaukseen tarkoitettu ohjelmoitava digitaalinen integroitu ohjainpiiri. Se on Dialog Semiconductorin valmistukseen tuleva IC-piiri, jolla pyritään tarjoamaan yksinkertainen, mutta älykäs ”plug & play”-ratkaisu joka vastaisi tämän päivän valaisinteknologian haasteisiin, kuten laitteiden koon pienenemiseen ja uusien liitäntämahdollisuuksien vaatimuksiin. iW6401-piiri kuuluu SmarteXite-tuoteryhmään ja on sen uusimpia edustajia.

iW6401 tukee erityisesti DLT-himmennystä ja tarjoaa myös ohjausmahdollisuuden ulkoisille langattomille ohjainmoduuleille. Se sisältää integroidun tilakoneen eri valaistuksen ohjaustoimintoja varten sekä LDO-regulaattorin, joka tarjoaa tasaisen käyttöjännitteen ulkoisille lisälaitteille. [26]

5.1 Ominaisuudet

iW6401 sopii sovellettavaksi himmennettäviin LED-lamppuihin ja -putkiin. Se sopii myös käyttöjänniteohjattuihin itsenäisiin LED-vakiovirtaohjaimiin, langattomiin himmennettäviin LED-valaisimiin, DLT-yhteensopiviin LED-valaisimiin ja älykkäitä sensoreita sisältäviin valaisimiin. Ohjauspiiri on suunniteltu DFN-12 -koteloon ja on käyttövalmis useille valaisinratkaisuille. Lisäksi se soveltuu Zhaga-standardin mukaisille valaisinmoduuleille. [26]

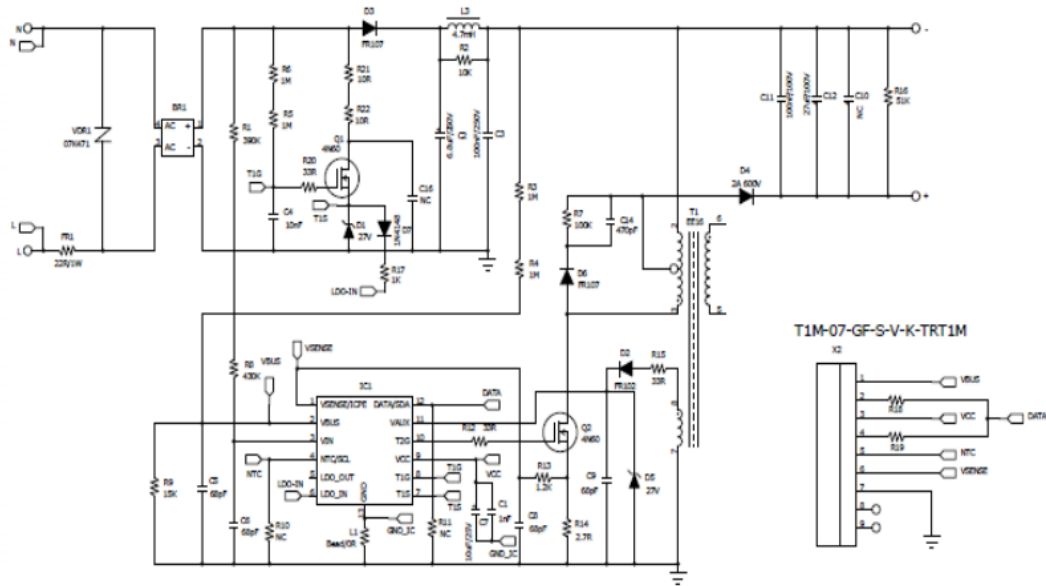
Kuvassa 5.1 näkyy iW6401-piirin lohkokaavio ja ulostulot. *Temperature sense* ja *control logic* nimensä mukaisesti ottaa sisäisen tai ulkoisen lämpömittarin arvon ja vertaa sitä valmiiseen maksimiraja-arvoon. Sisäinen tilakone säätelee toimintaa sen mukaan ja katkaisee lämpötilan maksimiarvolla virrat. Sisäisestä tilakoneesta on havaittavissa, että piirin asennuksen jälkeinen kalibrointi on mahdollista. Lisäksi himmennyskäyrää on mahdollista muuttaa halutessa ohjelmallisesti valmiista vaihtoehtoista. *POR & Internal Supply* ohjaa piirin käyttöjännitteitä kaikille piirin sisäisille osille. *V_{IN} Sense* suodattaa tasasuunnatusta käyttöjännitteestä digitaaliset arvot piirin muille toiminnoille.



Kuva 5.1 iW6401-piirin lohkokaavio. [26]

Kuten kuvassa 5.1 näkyy *OTP & System Clock* sisältää kaksi piirin sisäistä kelloa. Toinen kello-oskillaattoreista toimii 16 MHz:n taajuudella ja on aina päällä. Toinen 40 MHz:n kello on digitaaliseen laskentaan. Tämä sisäinen kello on päällä, kun käyttöjännite saavuttaa *lock-in* -kynnysjännitteen ja sammuu kun järjestelmä siirtyy horrostilaan. *OTP* sisältää 512 tavua eri asetustietoja. *Data Interface* on rajapinta sarja- ja i2c-kommunikoinnille, asetusten ja rekisterien muokkaukselle ja laitteen ohjaukselle. *Linear Control* taas antaa ohjausvirran sisäiselle MOSFET:lle, jolla voidaan ohjata ulkoista virtaohjaukseen tarkoitettua MOSFET:ia *T1S*-portista.

Dialog semiconductorin iW6401-piirin arviointiin tarkoitettu iWatt-kehitysalusta sisältää mahdollisen sovellusratkaisun iW6401-piirin ympärille. Kuvassa 5.2 on kyseisen kehitysalustan piirikaavio. Se on toteutettu DLT-protokollaa varten, eikä sisällä moduulia langattomalle lähiverkolle, vaikka siihen löytyy piiristä tuki. Piirikaaviossa näkyy verkkovirran sisäänmeno, jossa toisessa päässä on 22 ohmin tehovastus (*FR1*) ja molemmat sisäänmenot on liitetty varistoriin (*VCR1*), joka on rinnan tasasuuntaussillan kanssa (*BR1*). Tasasuuntaussillan jälkeen signaali menee *VIN*-porttiin. Tasasuuntauksen jälkeen muokattu jännite menee *T1G*- ja *T1S*-portin ohjaaman bypass-kuorman läpi, jolla ohjataan sisään tulevaa virtaa DLT-himmennyksen aikana.



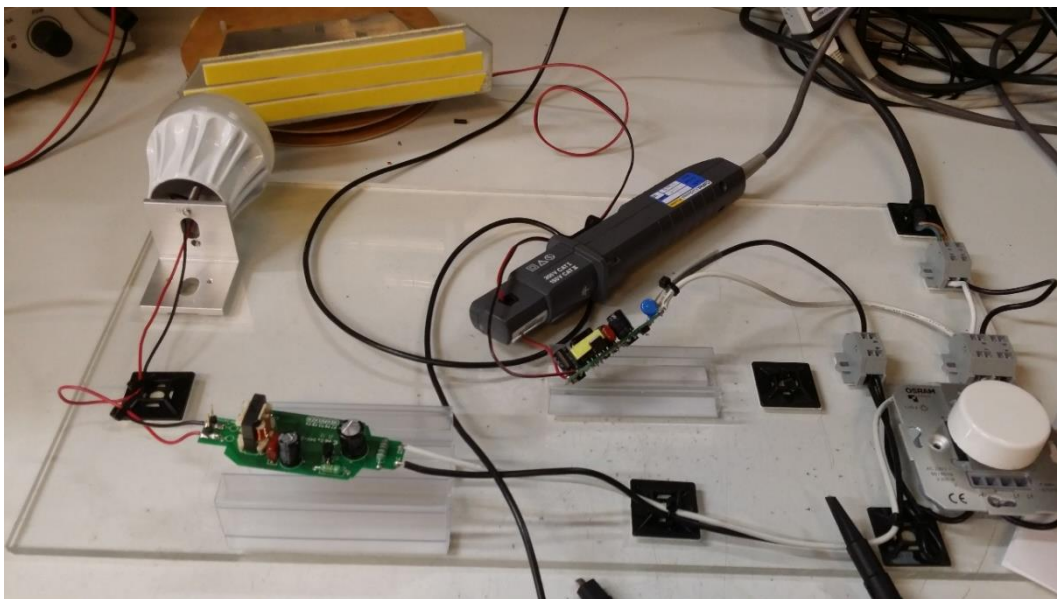
Kuva 5.2 iW6401 kehitysalustan piirikaavio. [27]

Kuvan 5.2 kytkennässä ulostulon potentiaaliero on toteutettu ohjauskytkennällä, jossa käytetään piirin $T2G$ -ulostulon ohjaamaa kanavatransistoria ($Q2$) ja muuntajan ($T1$) ensiötä. Kanavatransistorin ohjaus on kytkentää varten, joka kasvattaa miinusnavan jännitteen ja positiivisen navan jännitteen tasoeroa. Kytkentä toimii nostaen tasoa vaihtovirran ansiosta varautuvan muuntajan kelan jalkojen välillä. Muuntajan kelan virran suunta pysyy koko ajan samana, mutta diodin $D5$ läpi ei mene virtaa kun kanavatransistori on kiinni. Tällöin sisempi kytkentä muuntajan jalasta (2) päästää kelan indusoiman virran läpi ulostulon positiiviselle puolelle. Kun kanavatransistori on auki, pääsee kelan indusoituma energia diodin $D5$ läpi kasvattaen positiivisen ulostulon potentiaalieroa entisestään verrattuna ”negatiiviseen” ulostuloon. Muuntajan toisiossa on kytkentä ohjauspiirin V_{aux} -ulostuloon toimien takaisinkytkentänä, jolla voidaan seurata hakkuriteholähteen ulostuloa. Ulostulojännitettä voidaan näin korjata entisestään.

DLT-protokolla antaa vaatimuksen laajasta himmennysvälistä (1...100 %). Tämä himmennuksen säädettävyyden on toteutettu iW6401-piirin osalta siten, että yli 30 %:n tasolla ulostulovirtaa lasketaan himmennyksessä lineaarisesti, sillä LED pysyy tällä alueella aukinainen. 30 %:n alapuolella virta pysyy jatkuvana, mutta matala taajuusmodulaatio laskee keskiarvovirtaa.

6 MITTAUKSET

Mittauksissa selvitettiin iW6401-piirin ominaisuuksista ja arvioitiin sen soveltuvuutta DLT-yhteensopivien LED-valaisinten ohjainpiiriksi. Mittauksissa käytettiin Dialog Semiconductorin iW6401-ohjainpiirille suunnittelemaa iWatt-kehitysalustaa. Alustaan kytkettiin sopiva kuorma (LED-valaisinmoduuli), jotta saataisiin mahdollisimman realistisia tuloksia. Mittauksia suoritettiin kuvan 6.1 testausalustalla, jossa on mitattavat LED-lamput ja niiden osat.



Kuva 6.1 Testausalusta referenssi-LED-ohjainpiirille ja iWatt-kehitysalustalle.

Vertailua suoritettiin Osramin DLT-himmentimellä (kuva 6.1), joka kytkettiin verkkojännitteen ja valaisinohjainpiirin väliin. Kuten kuvassa 6.1 näkyy, virtamittapää oli kytkettynä mittauksissa LED-ohjaimen tulossa sekä myöhemmin lähdössä.

Toimintaominaisuuksia vertailtiin kuvassa 6.1 näkyvän toisen valmistajan referenssivalaisimen ja iWatt-kehitysalustan välillä. Referenssivalaisin tukee DLT-protokollaa ja on ensimmäisiä markkinoilla olevia Ledotron-tuotteita. Vertailtavan laitteen LED-ohjauselektronikka on toteutettu yksinkertaisilla komponenteilla mukaillen Lohaus & al [23] toteuttamaa DLT-vastaanotin-topologiaa.

DLT:tä ja sen vaatimuksia tutkittiin ja mitattiin hieman tarkemmin. Vertailtavia LED-ohjainpiirejä sekä LED-moduuleita mitattiin tärkeimmän ominaisuudet kuten teho, virtalähteen

käyttäytyminen, himmennuksen säädön ja tehon muutos. Lisäksi arvioitiin LED-lamppujen hyötysuhdetta ja erityisesti verkkoon syntyviä häiriöitä. Mittauksia tehtäessä otettiin huomioon, että iWatt-kehitysalustan kuormana käytetty LED-moduuli ei ollut varsinaisesti suunniteltu LED-ohjaimelle, joten välkynnän ja muiden LED-moduulin ominaisuuksien osalta ei saatu parhaita mahdollisia tuloksia.

LED-lamppujen ohjainpiirien ferriittimuuntajien (flyback-muuntajat) lämpötiloja mitattiin käyttäytymisen mittausten aikana, mutta merkittävää lämpötilan nousua ei havaittu. Lämpötila mitattiin vähintään 2 minuutin kuluttua himmennystason säädöstä. Lämpötilan maksimiarvo 50 °C mitattiin verrokkilaitteella hakkuriteholähteen ferriittimuuntajasta kirkkauden säädön maksimitasolla. iWatt-kehitysalustan vastaava maksimilämpötila ferriitistä mitattuna oli 46 °C myös valaisimen kirkkauden maksimitasolla, jolloin virtalähteen ulostuloteho on suurin. Huomioitavaa on, että virtalähteet eivät olleet lämpömittauksessa valaisimen koteloinnin sisällä, missä ne valmiissa tuotteessa ovat. Lämpötilat voivat siis nousta, jos koteloinnin lämmönjohtokyky on huono.

Myös muita valaisimen himmennysohjaimia testattiin lyhyesti kummallakin vertailulaitteella. Himmentimien topologiat perustuivat pääosin verkkojännitteen leikkaukseen. Kummallakin LED-ohjaimella käyttäytyminen oli samanlaista näillä analogisilla himmentimillä. Himmennuksen aluksi valaisin toimii normaalista. Tämän jälkeen seurasi valaisimen välkkyminen (noin 10–20 %:n alueella), jota seurasi valaisimen sammuminen kokonaan. Valaisimien hakkurilähteet eivät ole suunniteltu analogiselle himmennykselle, mikä näkyi myös mittaustuloksissa.

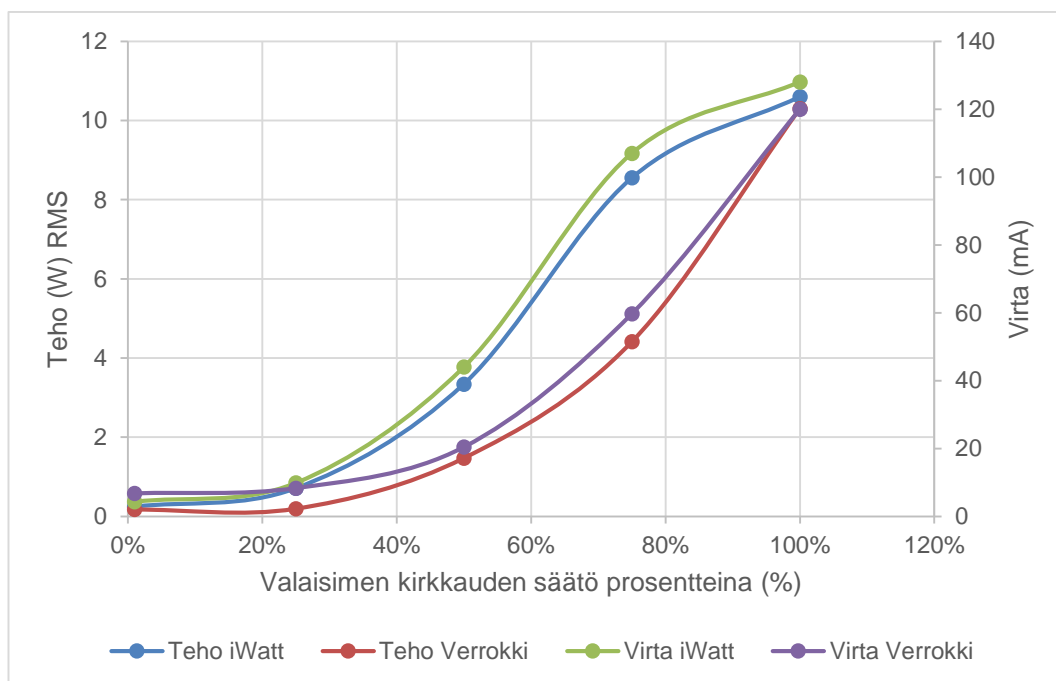
6.1 Mittalaitteet

Mittauksissa käytettiin Tektronixin TDS 2014C oskilloskooppia (liite 1, kuva 1) ja Fluken aktiivivirtamittapäätä. Lisäksi käytössä oli Rohde & Schwarzin spektrianalysaattori (liite 1, kuva 2), jolla suoritettiin laitteen johtuvien häiriöiden mittaukset. Valaisimen valoherkyyttä ja valon säteilyn tasaisuutta mitattiin omatekoisella valonherkkyysanturilla (liite 1, kuva 4). Lämpötiloja mitattiin infrapunälämpömittarilla sekä johtuvalla lämpömittarilla. Valon voimakkuutta ja värilämpötilaa mitattiin Minoltan lux-mittarilla.

6.2 Valaisinten tehon ja virran käyttäytyminen himmennyksessä

iW6401-piirin datalehtisessä oli ilmoitettu, että himmennuksen muutosta on mahdollista säätää ja että himmennys ei tehdä lineaarisesti. Valaisinten tehoja ja virtoja mitatessa havaittiin, että käyrät eivät ole kummassakaan mitatussa laitteessa lineaariset. Kuvassa 16 näkyy prosentuaalinen himmennuksen säätö, sekä virran ja tehon kuvaajat himmennuksen suhteen. iW6401-piirin ohjaaman LED-virtalähteen ohjaama teho- ja virtakäyrä mitattiin muuttuvan 0–20 % alueella loivasti ja jyrkemman muutoksen 20–80 % välillä. 80–100 % välillä teho kasvoi hieman loivemmin.

Kuvan 6.2 verrokkivalaisimen teho- ja virtakäyrä suhteessa himmennysprosentteihin havaittiin kasvavan aluksi pienillä prosenteilla loivasti ja 80 %:n kohdalla jyrkemmin.



Kuva 6.2 Testattujen valaisinten virran ja tehon kuvaajat himmennuksen suhteen.

Kuvan 6.2 tehokäyrät osoittavat, että DLT-himmennyksessä tapahtuva valaisimen tehon nosto tai lasku riippuu LED-lampun ohjauselektronikasta, sillä himmennin itsessään lähettää vain digitaalisia komentoja. Varsinainen tehon ohjaus tai leikkaus tapahtuu LED-ohjaimessa. Himmennyskäyrää voidaan siis muuttaa esimerkiksi LED-moduulin käyttäytymiselle tai käyttöympäristölle sopivaksi. Himmennyskäyriä mitatessa erot havaittiin myös paljain silmin valaisinten kirkkauksien eroina.

Valaisinten tehohyötysuhteita mitattiin lyhyesti ilman himmennystä (maksimitehoilla), jolloin hyötysuhteet pysyivät kehitysalustan osalta 89 %:n ja vertailtavan valaisimen osalta 80 %:n kohdilla, kuten valaisimien datalehtisissä oli mainittu.

LED-valaisinten värilämpötilaa mitattiin himmennuksen kaikilla tasoilla. Värilämpötila pysyi samana, kuten pitääkin. Verrokkilaitteen valovirtaa mitattiin ”laatikossa” ja havaittiin, että valmistajan antama 810 lm:n valovirta vastasi mitattuja maksimiarvoja.

6.3 Valaisimen lisälaitteen virran kulutus

Valaisimen ja ohjauslaitteen yhteinen virran kuvaaja mitattiin virtamittapäällä ja oskilloskoopilla LED-valaisimen ollessa päällä. DLT-protokollassa ja yleisesti LED-lisälaitteille tarkoitetuissa standardeissa on määritelty lisälaitteen käyttämän virran maksimiarvoja ja verkkovirran jakson ajallisia käyttöjännitevaatimuksia. DLT-protokollan rajoitus oli edellä mainittu 350 mA HC-jakson aikana. Tämä lisälaitteen, tässä tapauksessa DLT-ohjauslaitteen, käyttövirta on kuvan 6.3 mitatussa virtakuvaajassa pienempi lyhyehkö virran nousupiikki.



Kuva 6.3 Himmentimen ja LED-valaisimen kokonaisvirtamittaus.

Kuvan 6.3 virtakuvaajasta havaittiin myös itse LED-valaisimen virtalähteen käyttämä virtakuvaaja, joka on kuvaajan isoin alue. Kuvaaja nousee noin 250 mA:n tasolle alle 0,5 ms:n aikana ja laskee noin 3,75 ms:n kohdalla nollassa tasolle. LED-virtalähteen kuvaaja noudattelee 61000-3-2 -standardin määrittelemän virran kuvaajan raameja.

6.4 DLT-viesti mittauksissa

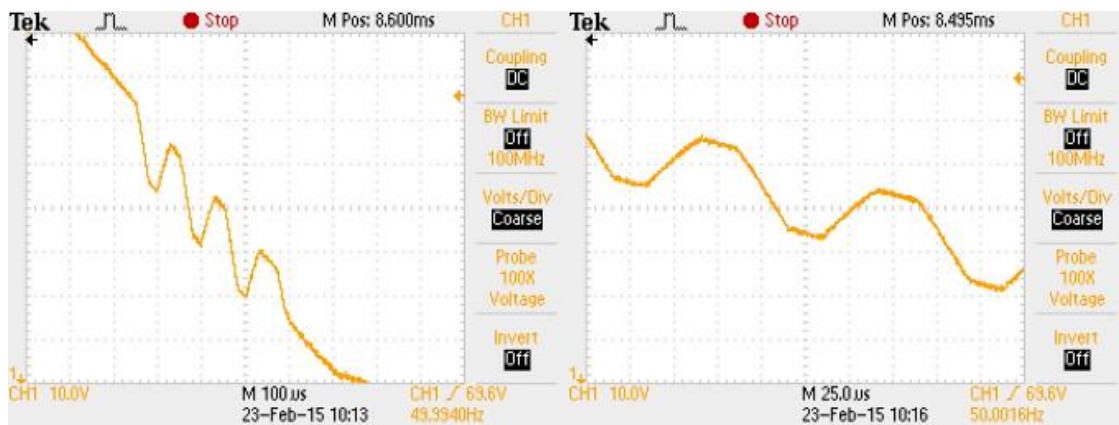
Kuten DLT-viestin standardissa ilmoitetaan, DTL-ohjain ottaa käyttöjännitteensä verkkojännitteestä nousevan aallonpuolikkaan alussa. Tämä oli nähtävissä myös mittauksissa ja Kuvassa 6.4.



Kuva 6.4 Mitattu käyttöjännitteen kuvaaja DLT-ohjaimen jälkeen ja tarkennettu kuvaaja ohjainyksikön käyttöjännitteen leikkauksesta.

Kuvassa näkyy jokaisen käyttöjännitteen aallonpuolikkaan alussa leikkaus, joka nousee noin 100 V:n asti ja ajallisesti 1 ms jaksonpuolikkaan 10 ms:n ajasta. Oikealla puolella olevassa tarkennetussa kuvassa havaitaan leikkaus vielä selkeämmin. Kuvassa 6.4 ei vielä havaita kunnolla DLT-viestiä, mutta tarkennettaessa havaitaan myös tämä.

Kuvassa 6.5 havaittiin selkeästi DLT-viestin bitit ja niiden pituus. Havaittavissa on 6 puolibittiä, eli 3 bittiä, kuten protokolla ohjeistaa. Ensimmäisen ja viimeisen puolibitin kuitenkin tiedetään olevan ennalta määrättyjä {1,0}, joten tässä tapauksessa mitatuissa kuvissa puolibittien viestin osa menee {1,0,1,0,1,0}.



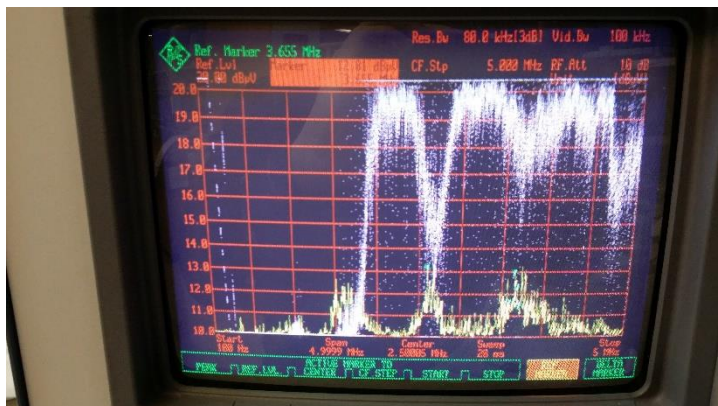
Kuva 6.5 DLT-viesti tarkennettuna ensimmäisestä jakson puolikkaasta tarkennettuna.

Kuvassa 6.5 näkyy myös mitattu DLT-viestin pituus kantoaallon puolikkaassa jaksossa ja taajuus databiteille. Tiedossa on, että ensimmäinen puolibitti on "1" ja viimeinen "0" ja, että puolibitin jännite on laskeva. Tällä tarkoitetaan, että puolibitti on 1-asennossa kun jännitteen taso on alempana ja 0-asennossa, kun jännitetaso on kantoaallon mukainen. Häiriösignaalia tai häiritsevää jännitteen vaihtelua ei näytä kuvassa aiheutuvan sähköverkosta tai LED-ohjaimesta. Databitit ovat selkeitä ja mahdolliset häiriöt eivät vaikuta tällä siirtonopeudella. Mittauksissa havaittiin myös, että useammallakaan himmennystason muutoksella ei kyetty aiheuttamaan häiriötä DLT-viestiin. DLT-protokollaa tukeva LED-lamppu toimi silti vakaasti. DLT-ohjaimen komennon ja LED-lampun reagoinnin välillä havaittiin silmin nähtävä viive kummallakin testattavalla lampulla. Tästä viiveestä ei kuitenkaan ole mitään selkeitä vaatimuksia tai rajoitteita standardeissa ja siksi viivettä ei huomioitu sen tarkemmin.

6.5 Johtuvat häiriöt mittauksissa

Kuten aikaisemmin mainittiin, on LED-laitteen ja lisälaitteen johtuvien häiriöiden rajat on esitetty IEC-standardissa. Johtuvien häiriöiden mittaukset suoritettiin spektrianalysointilla ja LISN-suodattimella (liite 1, kuva 2). Tarkoituksena oli varmistaa suuntaa antavilla mittauksilla, että häiriörajat täyttyvät iWatt-kehitysalustan, referenssilampun ja DLT-ohjausyksikön osalta. Tästä syystä tarkempia kalibrointeja tai ulkopuolisten häiriöiden tarkkaa suodatusta tai mittausta ei tehty. Ulkopuolisista häiriöistä syntyvä taustahäiriö suodatettiin spektrianalysointin omilla asetuksilla.

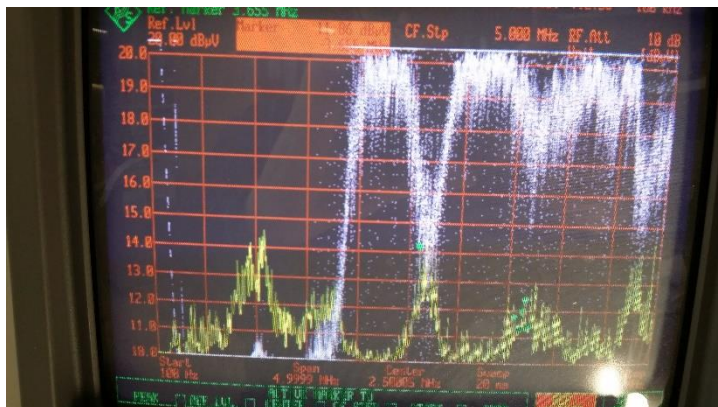
Kuvassa 6.6 näkyy referenssilampun minimitasolla mitatut häiriöt verkkoon. Ylempi viiva on alkuperäisen kuvaajan huippuarvoista ilman ulkoisten häiriöiden suodatusta. Varsinainen mittaustulos on alempi kuvaaja. Johtuvat häiriöt pysyvät alle 14 dB μ V:n tason.



Kuva 6.6 Referenssilampun johtuvat häiriöt verkkoon minimihimmennystasolla.

Kuvaaja pysyy alle 11 dB μ V:n n. 1,4 MHz:n taajuudelle asti. Tämän jälkeen häiriöt nousevat päälle 12 dB μ V:n tasolle. 2,25 MHz:n ja 2,5 MHz:n välillä taso on hieman päälle 10 dB μ V. Tämän jälkeen noin 2,75 MHz:n kohdalla häiriö nousevat lähes 12 dB μ V:n tasolle. Taso laskee 3 MHz:n kohdalla jälleen alle 11 dB μ V:n. Kuvaajan huiput ovat säännöllisiä ja ilmeisesti hakkuritopologian aiheuttamia nousuja, jotka toistuvat noin 1 MHz:n välein. Kuvassa 6.6 mitatulla DLT-ohjatun lampun minimitasolla ei ole standardissa asetettu raja-arvoja [4].

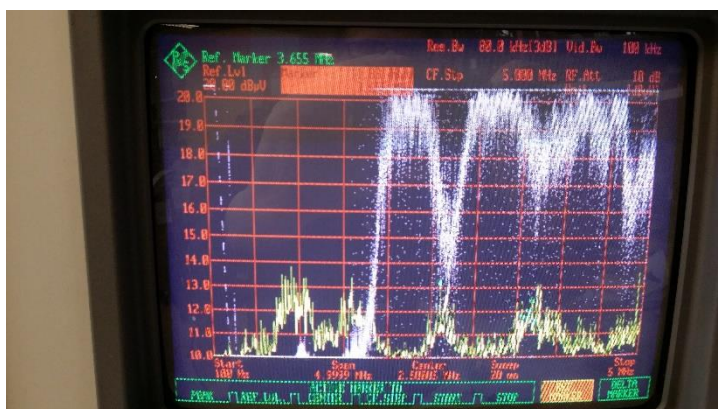
Kuvassa 6.7 mitattiin lampun himmennysenohjauksen maksimitasoilla, jolloin LED-valaisimen virtalähteestä syntyvät häiriöt huomattiin selkeämmin. Nousevat tason huiput toistuivat jälleen tasaisin välein, mutta nyt huippuarvot olivat jo yli 13 dB μ V:n tasolla. 1 MHz:n kohdalla kuvaaja nousi noin 14,5 dB μ V:n tasolle ja 1,5 MHz:n kohdalla kuvaaja on laskenut pienen kuopan kautta 14 dB μ V:n tasolle. Noin 2 MHz:n kohdalla häiriöt laskevat 10 dB μ V:n tasolle. Tämän jälkeen 2,5 MHz:n jälkeen taso kasvaa hieman yli 13 dB μ V:n ja laskee 3 MHz:iin asti 10 ja 11 dB μ V:n välille.



Kuva 6.7 Referenssivalaisimen johtuvat häiriöt verkkoon maksimihimmennystasolla.

Kuvassa 6.7 3,5 MHz:n jälkeen taso nousee 12 dB μ V:n tasolle ja laskee jälleen 4 MHz:n kohdalla alle 11 dB μ V:iin. Piikit kuitenkin vaihtelevat 10 ja 12 dB μ V:n välillä. Häiriöiden heilunnassa huomataan jälleen piikkejä tietyin taajuusvälein. Yleiset matalan tason häiriöt voivat aiheutua virtalähteen lisäksi muista ulkoisista ympäristön häiriöistä varsinkin korkeilla taajuuksilla, mutta piikit ovat selkeästi virtalähteen aiheuttamia. Häiriötasoja mitattiin 10 dB μ V:n tason yläpuolelta ja taajuusalue rajoitettiin 100 Hz:n ja 5 MHz:n välille.

Kuvassa 6.8 on verrattavana iWatt-kehitysalustan johtuva häiriö verkkoon mitattuna minimihimmennystasolla. Häiriö pysyy alhaalla alle 14 dB μ V:n, jonka huiput osuvat noin 0,9 MHz:n, 1,6 MHz:n, 2,6 MHz:n ja 3,75 MHz:n kohdille.

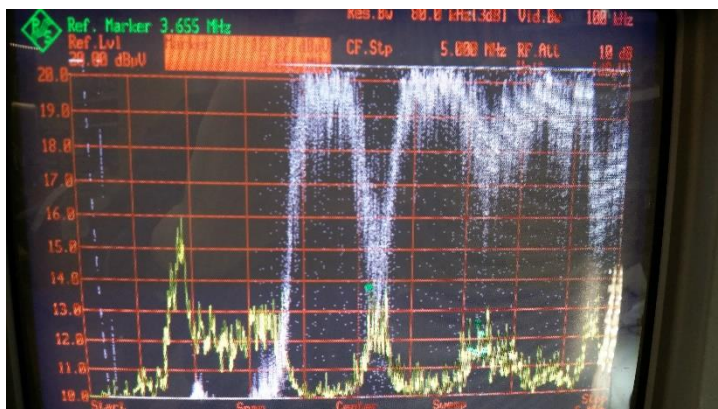


Kuva 6.8 iWatt-kehitysalustan johtuvat häiriöt verkkoon minimihimmennystasolla.

Huiput nousevat noin 13 dB μ V:n tasolle. 100 Hz:n ja 1 MHz:n välillä taso nousee 10 dB μ V:n tasolta melkein 14 dB μ V:iin. 1 MHz:n jälkeen taso liikkuu 11 dB μ V:n kohdalla ja nousee 1,5 MHz:n kohdalla jälleen 13 dB μ V:n tasolle. 2 MHz:n kohdalla taso on laskenut 10 dB μ V:iin.

3,5 MHz:n kohdalta taso nousee 12 dB μ V:n tasolle ja pysyy siellä 4 MHz:n taajuudelle asti. Tämän jälkeen häiriöt pysyvät 11 dB μ V:n tasolla.

Standardin kannalta merkittävämpi himmennyslaitteissa maksimitasolla mitattava johtuva häiriö näkyy kuvassa 6.9. Tässä johtuvat häiriöt nousevat jälleen samojen taajuuksien kohdalla, kuten minimitasolla. 100 Hz:n ja 0,75 MHz:n välillä häiriötaso pysyy 11 dB μ V:n alapuolella. Noin 0,9 MHz:n kohdalla huippu nousee 16 dB μ V:iin. 1 MHz:n kohdalla taso laskee alle 13 dB μ V:n ja pysyy samalla alueella 1,75 MHz:n taajuudelle asti. Tämän jälkeen taso laskee 10 dB μ V:n tasolle ja pysyy siellä 2,5 MHz:iin asti.



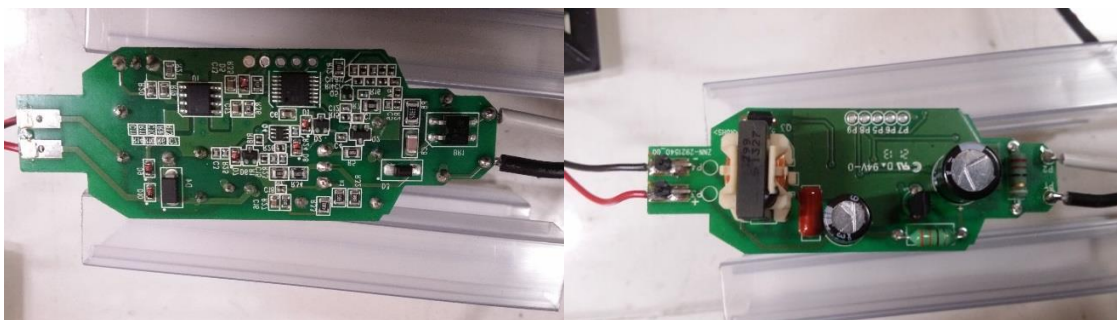
Kuva 6.9 iWatt-kehitysalustan johtuvat häiriöt verkkoon maksimihimmennystasolla.

Noin 2,6 MHz:n kohdalla on jälleen piikki, joka nousee hieman alle 14 dB μ V:n tasolle ja laskee jyrkästi 11 dB μ V:n tasolle 3 MHz:iin mennessä. Tämän jälkeen johtuvien häiriöiden taso pysyy 11 dB μ V:n tasolla ja nousee 3,5 MHz:n ja 4 MHz:n välillä 13 dB μ V:iin. 4 MHz:n taajuuden jälkeen häiriö laskee jälleen 11 dB μ V:iin. LED-valaisimen virtalähteen harmonisista monikertoimista johtuvien häiriöiden piikit nousevat, kun ulostulon taso kasvaa maksimiin. Häiriöt eivät kuitenkaan nouse standardin rajojen yli.

Johtuvien häiriömittauksissa huomioitavaa oli, että muualta tulevaa taustahäiriötä todettiin olevan runsaasti, mikä vaikutti varsinkin suurien taajuuksien osalta mittaustuloksiin. Tämän todettiin vaikuttavan myös nopean kalibroinnin osalta kalibrointi-arvoihin, jotka myös vaikuttivat näin ollen mittaustuloksiin. Mittaustulosten todettiin olevan kuitenkin suuntaa antavia ja tulosten havaittiin pysyvän standardin vaatimusrajoissa.

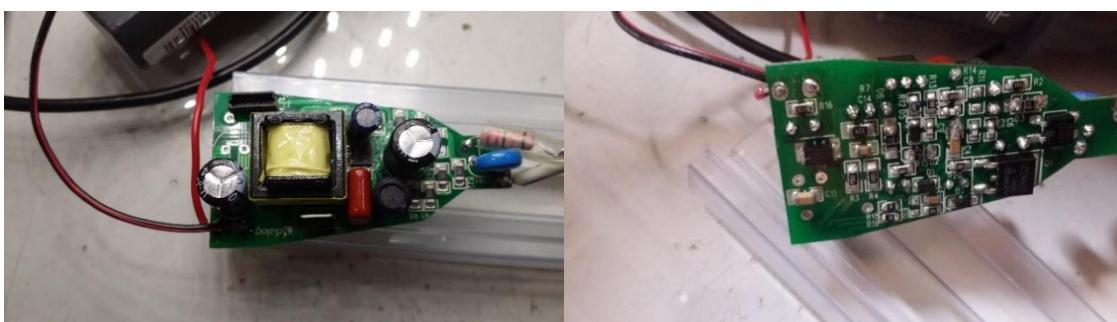
6.6 Virtalähteen toiminta himmennyksessä

DLT-protokollaa tukevan LED-valaisimen virtalähde sisältää DLT-viestiä vastaanottavan järjestelmän sekä ohjatun LED-virtalähteen. Sekä referenssivalaisin että iWatt-kehitysalusta vaikuttivat toimivan saman tyyppisellä topologialla. Kuten kuvassa 6.10 näkyy, referenssi-valaisimen ohjainpiiri toimii mikrokontrolleripiirillä, jossa tapahtuu sekä DLT-viestin vastaanotto, dekoodaus että LED-virtalähteen ohjaus.



Kuva 6.10 Vertailtava toisen valmistajan LED-ohjainpiiri.

Kuvassa 6.10 on vertailtavan LED-lampun virtalähde. Vasemman puoleisessa kuvassa näkyy ohjauselektroniikkaa ja mikrokontrolleripiiri, jolla DLT-himmennyksen vastaanotto ja ohjaus on toteutettu. Kuvan 6.10 oikean puoleisessa kuvassa näkyy hakkurilähteen kondensaattoreita ja flyback-muuntaja. Kytkenässä mikrokontrolleri saa DLT-viestin ja antaa ulostulosta ohjaussignaalia virtalähteelle, jolloin jännite ohjataan sopivalle tasolle.



Kuva 6.11 iWatt-kehitysalusta: LED-ohjainpiiri ja iW6401.

Kuvassa 6.11 olevan iWatt-kehitysalustan toiminta on monelta osin samanlainen, kuin aikaisemman kuvan 6.10 kehitysalustan piirikytkentä. iW6401-piiri ottaa DLT-viestin vastaan ja ohjaa hakkurivirtalähteen jännitteen halutulle tasolle.

iWatt-kehitysalustan LED-virtalähteen ohjausta mitattiin ulostulojännitettä oskilloskoopilla tarkastelemalla. Näissä mittauksissa huomattiin, että virtalähteen himmennyksessä jännitetaso ei pysy aivan tasaisena koko aikaa, sillä hakkuri ”sahalaitaistaa” signaalia tasoa laskiessa. Kuten liitteen 1 kuvan 5 oskilloskooppikuvaajissa huomattiin, on jännitetaso tasaisista valaisimen ollessa kirkkaimmillaan. Muutos huomataan tasoa laskiessa. Liitteen 1 Kuvassa 5 näkyy jännite, virta ja laskettu tehotaso ajan suhteen eri tehotasoilla, eli himmennysasteilla. Alussa kuvaaja on suora, kun jännitetaso on huipussaan. Vähitellen tasoa laskiessa signaali alkaa sahalaitaistua, kun virtalähteen jännitteenrajoitin laskee tasoa halutulle korkeudelle.

Kuvaajasta huomattiin, että jännite muuttui sahalaitaiseksi aalloksi jo jännitteen ollessa 80,2 V. Tällöin kuvaajan aallon taajuus oli 100 Hz:n kohdalla. Tasoa laskiessa havaittiin aallon amplitudiarvon pienentyvän, kuten jo 79,9 V:n tasolla tapahtui. Tällöin sahalaitaisuus väheni ja lopuksi tasoittui, kuten viimeisessä liitteen 1 kuvan 5 kuvaajassa havaittiin. Viimeisessä kuvaajassa myös saavutettiin himmennuksen minimitaso.

6.7 Välykyntä

Välykyntää mitattiin valoherkän kanavatransistorin sisältävällä laitteella (liite 1, kuva 4). Tällä saatiin hahmotettua kokonaiskuvaa valaisimen valon säteilystä, johon vaikuttaa tässä tapauksessa hakkurilähteen toiminnan lisäksi myös LED-moduulin LEDien ominaisuudet. Mitatut kuvaajat olivat ominaisuuksiltaan hyvin pitkälle mitattujen ulostulovirtojen kuvaajien kaltaisia. Kanavatransistorin vaimennuksia ei tiedetty, joten välykyntän arvoja laskettiin ja arvioitiin ulostulokuvaajista (Liite 1, kuva 5). Kaikissa tason kuvaajissa jännitettä esitetään oranssilla, virtaa sinisellä ja laskettua tehoa punaisella värillä.

Liitteen 1 kuvassa 5 on esitetty oskilloskoopilla ja virtamittarilla mitattuja ulostulojännitteen, virran ja lasketun tehon arvoja eri himmennystasoilla. Annetuilla kaavoilla ja ulostulon virran kuvaajista voitiin mitata välykyntäprosentti (engl. Flicker percent). Liitteen 1 kuvan 5 ensimmäisen kuvan (ei himmennystä) välykyntäprosentti on hyvin pieni, joten se jätettiin laskematta ja siirryttiin seuraavaan kuvaan. Tämän ja kolmen seuraavan kuvaajan välykyntäprosentit ovat:

$$100 \% \cdot \frac{100 \text{ mA} - 20 \text{ mA}}{100 \text{ mA} + 20 \text{ mA}} \approx 67 \%, \quad (13)$$

$$100 \% \cdot \frac{90 \text{ mA} - 10 \text{ mA}}{90 \text{ mA} + 10 \text{ mA}} \approx 80 \%, \quad (14)$$

$$100 \% \cdot \frac{85 \text{ mA} - 10 \text{ mA}}{85 \text{ mA} + 10 \text{ mA}} \approx 78 \%, \quad (15)$$

$$100 \% \cdot \frac{40 \text{ mA} - 10 \text{ mA}}{40 \text{ mA} + 10 \text{ mA}} \approx 60 \% \quad (16)$$

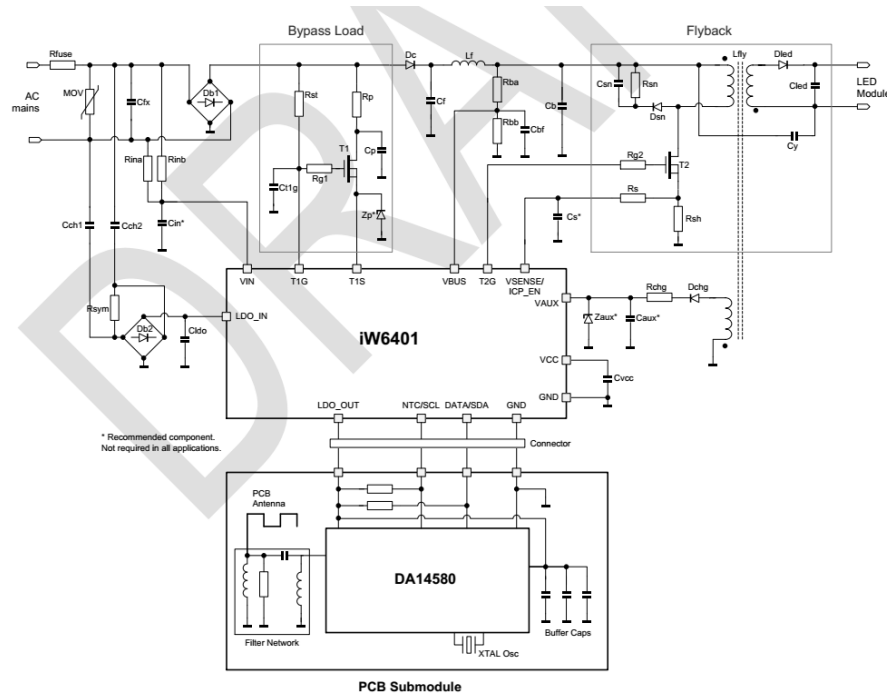
Liitteen 1 kuvan 5 toisen kuvaajan virran huippuarvo mitattiin 100 mA:n tasolle ja alataso 20 mA:n kohdalle. Näin ollen laskukaava on esitetyn kaavan 13 mukainen. Seuraavan kuvaajan virran huippuarvoksi saatiin 90 mA ja miniarvoksi 10 mA. Samalla kaavalla saatu tulos laskettiin kaavassa 14. Seuraavassa kuvaajassa huippuarvo on laskenut 85 mA:n tasolle ja alaraja pysyy 10 mA:n tasolla. Näin ollen välkyntäprosentti on kaavan 15 mukainen. Kaavan 16 tulos on liitteen 1 kuvan 5 vasemmassa alakulmassa oleva kuvaaja, jossa virran maksimiarvo mitattiin 40 mA:n ja minimi 10 mA:n tasolle.

Viimeisen kuvaajan välkyntäprosentin laskeminen ei ollut mielekäästä, sillä tasaisella virran tasolla välkyntäprosentti lähestyy nollassa. Välkyntäprosentteista huomataan, että virran kuvaaja tasaantuu minimitasossa ja maksimitasossa. Pahimmillaan välkyntää syntyy siis himmennuksen keskivaiheilla alueella, jolla virtaa leikataan keskiarvoisen virran tason alas saamiseksi.

7 SOVELLUKSET JA POHDINTA

LED-valaisimen ohjausta varten kehitettyä iW6401-piiriä voidaan soveltaa DLT-protokollan lisäksi muille ohjausjärjestelmille, kuten langattomaan Bluetooth-ohjaukseen. Tämä on mahdollista lisäämällä piirikytkentään ulkoisen moduulin. Kehitysalusta oli toteutettu virtalähteen ohjauksella, jolla mahdollistettiin suuri kuorma. LED-ohjain ei kuitenkaan ollut täysin eristetty verkosta. Turvallisuuden lisäämiseksi ja varmemman toimivuuden takaamiseksi hakkuriteholähdepuoli voitaisiin toteuttaa flyback-topologialla, jolloin LED-moduuli saataisiin eristettyä flyback-muuntajan toision puolelle ja muu ohjauselektronikka jäisi muuntajan ensiön puolelle. Flyback-muuntajan hyödyntäminen tarjoaisi myös toision puolelle useamman kuorman kytkemisen rinnan, jos muuntajassa on tarjolla riittävästi toision jalkoja.

Kuvassa 7.1 on esimerkkikytkentä iW6401-piirille ja Dialog Semiconductorin Bluetooth-moduulille suunnitellusta ratkaisusta. [26]

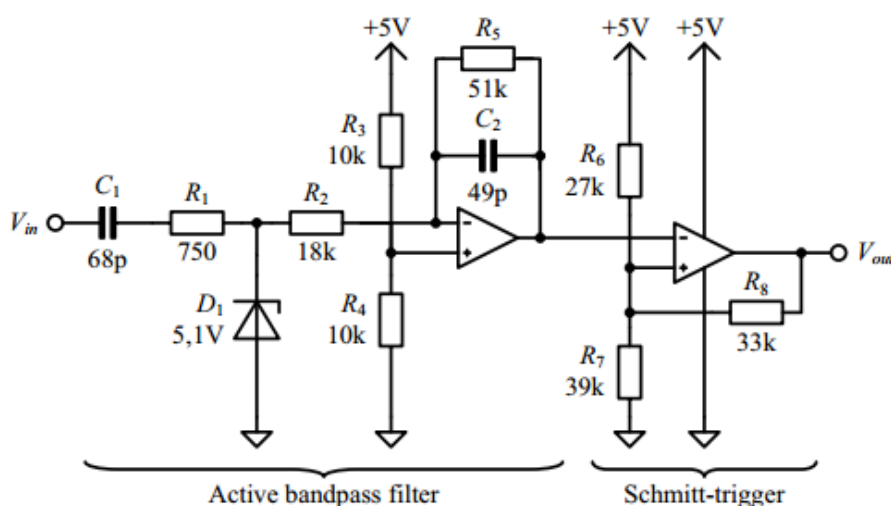


Kuva 7.1 iW6401-piirin datalehtisen esimerkkipiirikytkentä Bluetooth-moduulilla. [26]

Kuvan kytkennässä on hyödynnetty flyback-topologiaa teholähteen ohjauksessa ja näin ollen toteutettu lähes täysin eristetty kytkentä. Kuvan 7.1 kytkentä on piirin datalehden [26]

ehdottama kytkentä ja edellä esitellyn kuvan 5.2 tyyppinen ratkaisu iW6401-piirille. Eroina kuitenkin on flyback-topologian muuntajan eristys hakkuriteholähteen ja LED-moduulin välillä. Bluetooth-moduuli kytketään iW6401-piirin *LDO_OUT* -ulostuloon, josta moduuli saa jännitteensä, *GND* toimii maapotentiaalina ja *NTC/SCL*- sekä *DATA/SDA* -väylät ovat dataohjausta varten.

Toinen ratkaisu piirikytken toteuttamiseksi voisi olla ilman iW6401-piiriä, jolloin ohjaus tehtäisiin yksinkertaisella mikrokontrollerilla ja himmennuksen sallivalla LED-ohjauspiirillä. DLT-signaalin suodatus mikrokontrollerin sisääntuloon sopivaksi voitaisiin toteuttaa kuvan 7.2 aktiivisen kaistansuodattimen ja schmitt-kytkimen yhdistelmällä.



Kuva 7.2 DLT-viestin suodatus verkkojännitteestä. [23]

Kuvan 7.2 kytkentää testattiin Lohaus & al [23] toimesta hyvin tuloksin. Datasignaali voitaisiin näin ollen vastaanottaa ”puhtaana” mikrokontrollerille, joka dekoodaisi viestissä annetun himmennystason ja ohjaisi esimerkiksi PWM:llä tai jännitetasolla LED-ohjauspiiriä. LED-moduuliksi kuorman osalta sopii parhaiten kytkentä, jossa hyödynnetään useampaa LED-komponenttia.

7.1 Päätelmät

DLT-protokolla havaittiin erittäin toimivaksi ja varmaksi himmennysohjauksessa. Perinteisten valaisinhimmentimien, kuten Triac-himmentimen, ongelmat tulevat esiin kulutta-

jien siirtyessä LED-lamppuihin. Tavallinen LED-virtalähde ei kyennyt toimimaan mittauksissa varmasti perinteisten himmentimien leikatessa verkkojännitteen vaihetta tai amplitudia. Erityisesti himmentimen alarajan kohdalla LED-lamppu välkkyi tai sammui kokonaan. DLT toimii moitteettomasti tässä tilanteessa, sillä himmennys tapahtuu digitaalisesti. Monimutkaisemmassa ohjauksessa (esimerkiksi väriohjauksessa) DLT-viestin viive saattaa aiheuttaa ongelman. Sähköverkon häiriöt tai muut häiriöt eivät aiheuttaneet ongelmaa DLT-viestille, sillä databittien siirtonopeus on vain 200 b/s. Standardi täyttää EMC- ja EMI-standardien vaatimukset.

Mittauksissa käytettiin Dialog Semiconductorin iWatt-kehitysalustaa, johon kytkettiin sopiva LED-moduuli kuormaksi ja verrattiin sitä referenssilamppuna käytettyyn DLT-protokollaa tukevaan 75 W:n LED-lamppuun. Testeissä selvitettiin LED-ohjainpiirin hyötysuhdetta ja toimintaa eri himmennystasoilla, kuten maksimi- ja minimivalaisutehoilla. Lisäksi mitattiin valovirtaa kytketyistä LED-moduuleista. DLT-viesti havaittiin mitattaessa himmentimen jälkeistä verkkojännitettä. Erityisen huomion kohteeksi mittauksissa otettiin LED-ohjaimen ulostulon tasajännite ja LED-moduulin säteilyn tasaisuus. Amplituditason vaihtelu voidaan havaita muun muassa välkkymisenä. Lopuksi selvitettiin vielä LED-lampujen ja himmentimen aiheuttamaa johtuvaa häiriötä sähköverkkoon ja arvioitiin niitä EMI- ja EMC-standardien valossa.

Referenssivalaisimessa on toteutettu mikrokontrolleriohjauksella, joka osaa myös lukea DLT-viestejä. Himmennysviestin jälkeen reagointi oli pehmeä ja silmämääräisesti hitaampi kuin iW6401. Tämä voi johtua sekä mikrokontrollerin hitaudesta, halutusta viiveestä ja josain määrin myös LED-ohjain -topologiasta, jos ei oteta huomioon DLT-viestin hidasta tiedonsiirtoa. Välkyntäilmiötä syntyi jonkin verran vähemmän referenssi-lampussa. Johtuva häiriö oli myös pienempää kuin iWatt-kehitysalusta ratkaisussa.

iWatt-kehitysalusta on toteutettu iW6401-ohjainpiirin ympärille ja ohjaa niin himmennystä kuin hakkurivirtalähdettä. Ulostulojännitteen tasaisuus oli iWatt-kehitysalustalla heikompaan tehon keskivaiheilla, jolloin syntyi eniten välkyntää. Silmillä selvästi huomattavaa välkyntää ei kuitenkaan syntynyt, sillä molemmissa laitteissa tämä oli vähäistä ja värähtelytaajuus suurta. Johtuvissa häiriömittauksissa harmonisten häiriöiden tasot eivät nousseet yli sallittujen standardin rajojen, mutta tuloksilla osoitettiin, että referenssilaitteella johtuvaa häiriötä syntyi vähemmän. Kehitysalusta reagoi nopeammin DLT-himmennykseen kuin referenssivalaisin.

iW6401 on ominaisuuksiltaan monipuolinen sisältäen täyden DLT-tuen lisäksi *I2C*- ja *serial*-rajapinnan ohjelmoitavuutta varten. Mahdollista on näin ollen käyttää ohjainpiiriä langattomaan valaisinsovellukseen esimerkiksi Bluetooth-ohjauksella. Valaisinsovelluksen kokoa saadaan pienemmäksi, sillä iW6401 sisältää jo valmiiksi suuren osan LED-virtalähteen tarvittavista ominaisuuksista.

Valmiina ratkaisuna referenssivalaisin pärjasi mittauksissa paremmin ja viimeistellymmin, mutta tulee ottaa huomioon, että iWatt-kehitysalusta ei ollut valmis tuote eikä iW6401-piirin versio ei ollut vielä valmistusvaiheessa tai loppuun asti suunniteltu tuote. Valmis piiri luultavasti tulee toimimaan paremmin ja joustavammin. Lisäksi kehitysalustalle annettu kuorma (LED-moduuli) ei ollut varta vasten LED-ohjausmoduulille kehitetty, vaikka kuorma olikin iWatt-kehitysalustan piirikytkennän vaatimusten mukainen.

Selvityksessä mitattuihin tuloksiin nojaten suositeltavaa olisi kehittää ohjainkytkentää iW6401-piirin ympärille, jotta toimivuus ja laatu pääsisivät referenssivalaisimen tasolle. Tutkimuksessa ei päästy hyödyntämään iW6401-piirin kaikkia ominaisuuksia Dialog Semiconductorin piirin kehitystyön viivästyttyä sekä kehitysalustalle tarkoitetun ohjemateriaalin heikon saannin ja keskeneräisen datalehtisen takia. Myöskään DLT-standardiin ei työssä päästy suoraan tutustumaan ja protokollan standardin ensimmäinen osa julkaistiin opinäytetyön kannalta myöhäisessä vaiheessa. DLT-protokollan vakiintuessa aiheen tutkimusten merkitys ja sovellusratkaisuiden määrät kasvavat. Myös tästä syystä tutkimus on erittäin ajankohtainen.

8 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin uutta Digital Load-Side Transmission -standardia, digitaalista valaisinhajausprotokollaa, ja sen soveltuvuutta LED-valaisinten himmennuksen säädössä. Työssä tutustuttiin DLT:tä tukevaan iW6401-ohjainpiiriin ja verrattiin ohjainpiirin kehitysalustaa toisen valmistajan kehittämään DLT-valaisimeen. Tarkoituksena oli selvittää standardin ja iW6401-piirin käyttökelpoisuus DLT-yhteensopiville sovelluksille.

LED-valaisinten, DLT-standardin ja iW6401-ohjainpiirin ajankohtaisuus ja yleinen tarve vastaaville teknologioille olivat syynä työn toteuttamiseen. Työssä verrattiin iW6401-kehitysalusta piiriratkaisua kilpailijoiden DLT:tä tukeviin ratkaisuihin. LED-ohjain-sovelluksia testattiin himmentyvyyden, tehon käyttäytymisen ja yleisen toiminnallisuuden osalta. DLT:n toimintaa testattiin ja arvioitiin eri LED-laitteille ja -lisälaitteille asetettujen standardivaatimusten valossa. Näitä olivat esimerkiksi johtuvien häiriöiden rajoitukset ja LED-lisälaitteen käyttövirran rajoitukset. Myös välkyksen rajoituksia tutkittiin. iW6401-piirin hyödyntämistä DLT:tä tukevissa LED-valaisinsovelluksissa pohdittiin.

Protokolla ja sovellukset todettiin toimiviksi. Mitatut arvot pysyivät standardien asettamissa rajoissa. Valmiin ohjauspiiriin käyttö osoittautui helpoksi ratkaisuksi valaisinsovelluksen toteuttamiseen, mutta myös yksinkertaisempi ratkaisu esitettiin vartenotettavaksi vaihtoehdoksi.

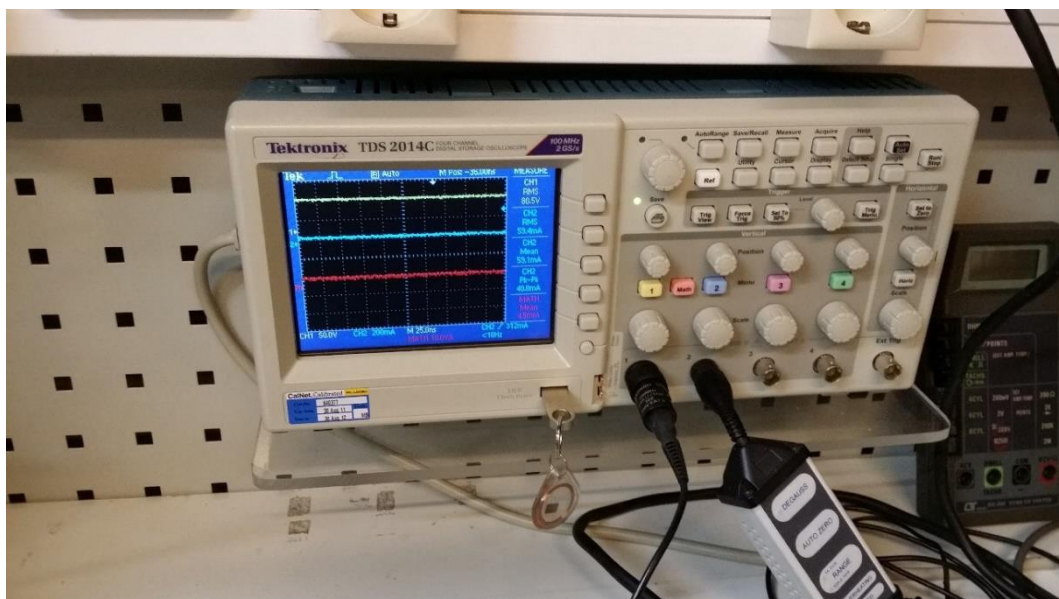
Tehtyjen selvitysten ja protokollan toimintaan tutustumista voidaan hyödyntää erityisesti DLT-protokollaa käyttävien valaisinsovellusten suunnittelussa ja kehitystyössä. Protokolla ja sovellukset todettiin toimiviksi, joten DLT:tä hyödyntävien valaisinlaitteiden kehittäminen on täysin mahdollista. iW6401-piiriä käyttävä valaisinsovellus olisi luonnollinen suunta työn jatkamiselle. Tutkimusta voitaisiin myös jatkaa DLT-protokollan kanssa yhteensopivien yksinkertaisempien ratkaisuiden osalta, kuten pohdinnassa esitettiin. Tämän tyyppisen valaisinsovelluksen toteuttaminen ja standardien mukaisten rajojen mittaaminen voisi olla erittäin hyödyllistä tulevien LED-valaisimien himmennyssovellusten kehitystyölle.

Lähdeluettelo

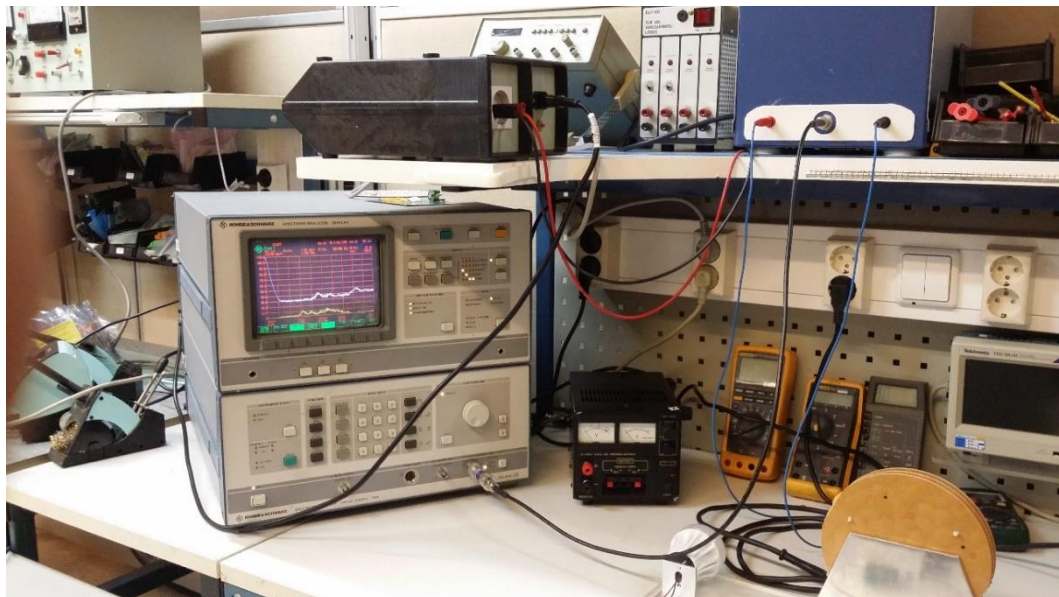
- [1] Guide to reliable planning with LED lighting, Zwei
- [2] Gregg Sheehan, "Facts about dimming," LED professional Review, 1/2 2011, 23. julkaisu, s. 48-56, 2011.
- [3] Siebel, B., "DLT / LEDOTRON – New Digital Standard for the Control of LED Lamps," [pdf-dokumentti]. Saatavilla: http://www.enlight-project.eu/user/files/insta_ledotron-article_25_09_2013.pdf. (Luettu: 13.11.2014).
- [4] SFS-KÄSIKIRJA 651-2, Helsinki: SFS, 2012, 329 s.
- [5] SFS-KÄSIKIRJA 1, Helsinki: SFS, 2012, 39 s.
- [6] Projekti IEC 62756-1 Ed. 1.0, International Electrotechnical Commission, Technical Committee 34 (TC34): Lamps and related equipments, Subcommittee (SC 34C): Auxiliaries for lamps. Saatavilla: http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:0::::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1343,25. (Viitattu: 19.7.2015).
- [7] Schubert, E. F., Light-Emitting Diodes. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, 422 s.
- [8] Kimmo Silvonen, Elektroniikka ja puolijohdekomponentit, Otatieto, Helsinki 2009
- [9] Cree, Inc. Cree XLamp XP-G LEDs (2016). [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/XLamp-Application-Notes/LED_Luminaire_Design_Guide.pdf (luettu 10.3.2016).
- [10] McKinsey & Company, "Lighting the way: Perspectives on the global lighting market," [pdf-dokumentti]. Saatavilla: http://www.2012.smartlighting.org/pdf/MCKINSEY_LIGHTING_THE_WAY_AHEAD.pdf (luettu 10.3.2016).
- [11] SFS-KÄSIKIRJA 651-1, Helsinki: SFS, 2012, 556 s.
- [12] Zhaga Consortium, "Zhaga interface Specification Book 1 Edition 1. 7." [pdf-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.zhagastandard.org/books/overview>. (Luettu: 23.2.2016).
- [13] Poplawski, ME, Miller, NM, Flicker in Solid-State Lighting: Measurement Techniques, and Proposed Reporting and Application Criteria, [pdf-dokumentti]. Saatavilla: http://www.lichtundgesundheit.de/Lichtundgesundheit/Blog/Eint-rage/2013/5/31_Auf_wie_vielen_Augen_darf_man_blind_sein_files/Pop-lawski%20and%20Miller%20CIE%20Flicker%20Paper%202013%20shorter-1.pdf (Luettu: 19.7.2015).
- [14] Cree, Inc. "Flicker happens. But does it have to?" [pdf-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/White%20Papers/Flicker.pdf>. (Luettu: 10.3.2016).
- [15] K. I. Whu, W. C. Tu, Y. T. Fang, Dimmable AC LED Driver with efficiency improved based on switched LED module, Journal of Display Technology, 2014

- [16] Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T., Falck, E., "Yliaalto-opus," [pdf-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>. (luettu: 22.2.2016).
- [17] Yu, L., Yang, J., "The topologies of white led lamps power drivers," Power Electronics Systems and Applications, 2009. PESA 2009, 3rd International Conference, 6 s., 2009.
- [18] Practical Switching Power Supply Design, Academic Press, San Diego, USA, 1990, 240 s.
- [19] RF EMC Development," EN 55015:2006 Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment," [html-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.rfemcdevelopment.eu/en/emc-emi-standards/en-55015-2006>. (Luettu: 9.3.2016).
- [20] Vilppo, J., Valaistuksen ohjausjärjestelmien säädettävyys valonlähteiden yhteensopivuuden ja ominaisuuksien kannalta, opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2013, 70 s.
- [21] Dimming of LED retrofit Lamps -diat, [pdf-dokumentti]. Saatavilla: [http://www.olafsson.is/resources/Files/Olafsson_is/Frodleikur/2013-03-26_Dimming-for-Dummies-\(5\).pdf](http://www.olafsson.is/resources/Files/Olafsson_is/Frodleikur/2013-03-26_Dimming-for-Dummies-(5).pdf). (Luettu: 19.7.2015).
- [22] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2005/32/EY, Energiaa käyttävien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle asetettavien vaatimusten puitteista sekä neuvoston direktiivin 92/42/ETY ja Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivien 96/57/EY ja 2000/55/EY muuttamisesta, 2005.
- [23] Lohaus, L., Rossius, A., Wunderlich, R. ja Heinen, S., "A Comparison of Receiver Topologies for Digital Load-Side Transmission in General LED Lighting," *IEEE*, 249–254, 2014.
- [24] Lohaus, L., Rossius, A., Wunderlich, R. ja Heinen, S., "A Power Supply Topology Operating at Highly Discontinuous Input Voltages for Two-Wire Connected Control Devices in Digital Load-Side Transmission (DLT) Systems for Intelligent Lighting," *IEEE*, s. 1897–1904, 2015.
- [25] Lohaus, L., Rossius, A., Sturm, A., Wunderlich, R. ja Heinen, S., "An Efficient Dual-Stage Power Supply Topology for Series Connected Control Devices in Intelligent Lighting Systems," *IEEE*, 2453-2460, 2015.
- [26] "iW6401 preliminary datasheet," Dialog Semiconductor, Dialog Semiconductor (UK) LTD 100 Longwater Avenue, Green Park Reading RG26GP, Yhdistynyt Kuningaskunta.
- [27] "LED DIMBALE DRIVER with iW6401 LEDOTRON Compatable," Dialog Semiconductor, Dialog Semiconductor (UK) LTD 100 Longwater Avenue, Green Park Reading RG26GP, Yhdistynyt Kuningaskunta.

Mittauskuvat



Kuva 1. Mittauksissa käytetty Tektronix-oskilloskoopi.



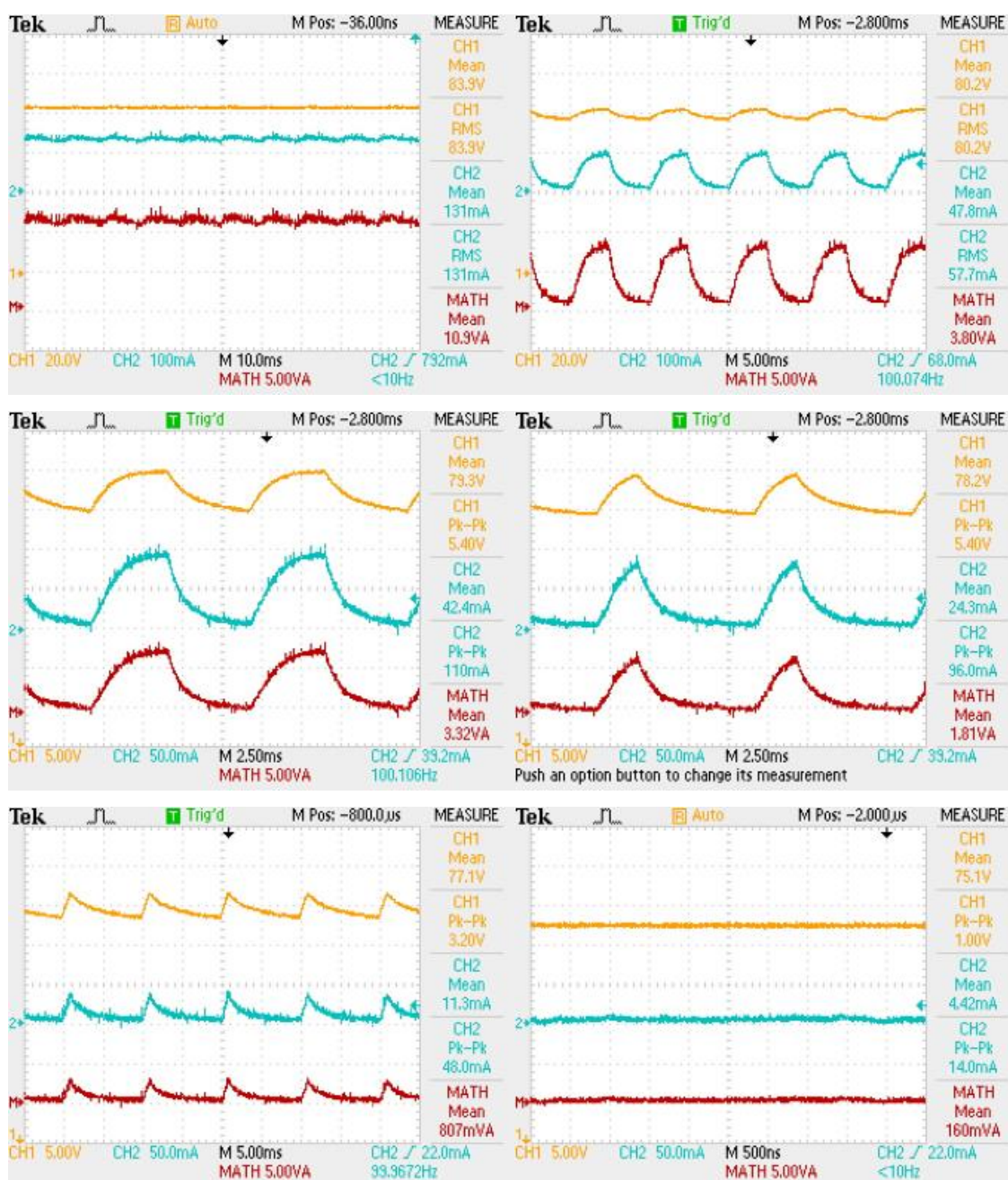
Kuva 2. Häiriömittauksissa käytetty spektrianalysaattori, suojaerotusmuuntaja (musta laatikko) ja maaerotin (sininen laatikko).



Kuva 3. Spektrianalysaattorin sovitinvaimennin.



Kuva 4. Valonherkkyyden mittauksessa käytetty laite.



Kuva 5. iWatt-kehitysalustan ulostulojännite oskilloskoopilla mitattuna ilman himmennystä ja vähitellen himmentäen aina minimiin asti.